

Кеннет Дж. Валентас  
Энрике Ротштейн  
Р. Пол Сингх

# ПИЩЕВАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

трубопроводы

морозильные агрегаты

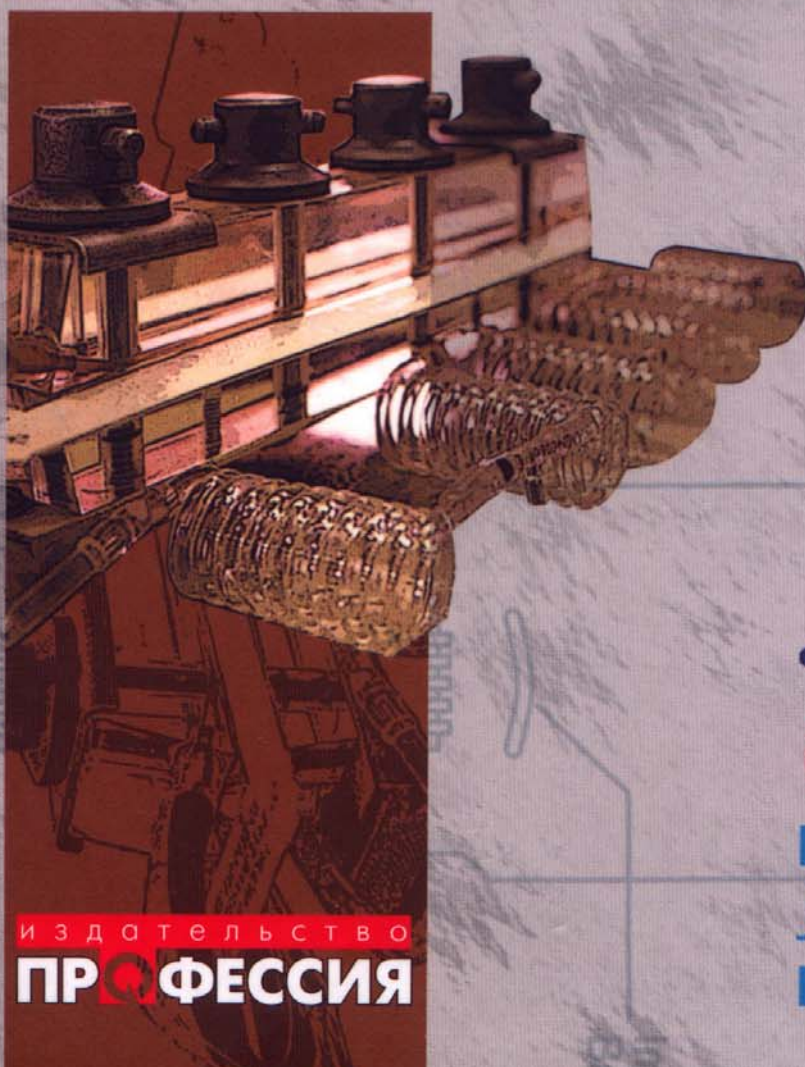
сушилки и выпарные аппараты

мембранные системы

упаковка пищевых продуктов

реологические свойства

основы пищевой химии



издательство  
**ПРОФЕССИЯ**

GRUNDFOS 

ПОИСКУП

Atlas Copco

H a n d b o o k o f

Food  
Engineering  
Practice

e d i t e d b y

Kenneth J. Valentas

Enrique Rotstein

R. Paul Singh



CRC Press

Boca Raton New York



# Пищевая инженерия

---

Справочник  
с примерами расчетов

под редакцией

---

Кеннета Дж. Валентаса  
Энрике Ротштейна  
Р. Пола Синаха

перевод с английского  
под общей редакцией А. М. Ишевского

Санкт-Петербург

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
**ПРОФЕССИЯ**

2004

УДК 664 (076.5)  
ББК 65.304.25 я7

Валентас К. Дж., Ротштейн Э., Сингх Р. П.

**В15** **Пищевая инженерия: справочник с примерами расчетов** / Валентас К. Дж., Ротштейн Э., Сингх Р. П. (ред.) / пер. с англ. под общ. науч. ред. А. Л. Ишевского. — СПб: Профессия, 2004. — 848 с., ил., табл., сх. — (Серия: Справочник).

ISBN 5-93913-045-3

ISBN 0-8493-8694-2 (англ.)

Рассмотрены основные принципы работы различного оборудования для пищевой промышленности — сушильных и выпарных аппаратов, холодильных агрегатов, тестомесильного оборудования, трубопроводов, систем СІР и т. п. Приводятся примеры расчетов, необходимых для правильного проектирования и эксплуатации установок с учетом экономических аспектов производства. Большое внимание уделено реологическим и теплофизическим свойствам выпускаемых пищевых продуктов (приведены необходимые количественные данные). Отдельная глава посвящена основам пищевой химии для инженеров.

Современное, не имеющее российских аналогов издание предназначено для инженеров и технологов пищевых производств, специалистов энергетических служб предприятий, проектировщиков и поставщиков оборудования, сотрудников инжиниринговых компаний, а также может быть использовано в учебном процессе студентами и преподавателями высших учебных заведений.

Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав.

Информация, содержащаяся в данной книге, получена из источников, рассматриваемых издательством как надежные. Тем не менее, имея в виду возможные человеческие или технические ошибки, издательство не может гарантировать абсолютную точность и полноту приводимых сведений и не несет ответственности за возможные ошибки, связанные с использованием книги.

Original English language edition published by CRC Press LLC.  
All rights reserved CRC Press LLC.

ISBN 5-93913-045-3

ISBN 0-8493-8694-2 (англ.)

© 1998, CRC Press LLC

© 2004, изд-во «Профессия»

© 2004, Ашкинази В., перевод глав 7, 10, 12, 13

© 2004, Игнатович В., перевод глав 3, 5, 14

© 2004, Левашин С., перевод главы 6

© 2004, Рапопорт Д., перевод глав 1, 2, 9, 11, Предисловие

© 2004, Савченков Н., перевод глав 4, 8, 15–17

УДК 664 (076.5)  
ББК 65.304.25 я7



# Выражение признательности

Издательство «Профессия» выражает благодарность

Главному инженеру ОАО «Парнас-М» *Голованцеву Андрею Сергеевичу*,  
Главному пивовару ОАО «Комбинат им. Степана Разина» *Чернышову Игорю Серафимовичу*,

Главному инженеру ОАО «Петербургский мельничный комбинат»  
*Овечкину Виктору Юрьевичу*

Руководителю отдела продаж оборудования для пивоварения ОАО «Альфа Лаваль Поток» *Рябикову Виктору*, а также специалистам ОАО «Пивоваренная компания «Балтика» и ОАО «Хлебный Дом» за экспертные заключения и ценные советы, данные при подготовке книги.

Особая признательность редакторам книги *Базарновой Юлии Генриховне* и *Буровой Татьяне Евгеньевне* за ответственный труд по организации и подготовке русского издания справочника.

## Организации и компании, разместившие рекламу в книге

«Атлас Копко», ЗАО .....	Цв. вклейка в конце книги
«Грундфос», ООО .....	Главы 5,15
«Данфосс», ЗАО .....	Глава 10
«Лайнкул», ООО .....	Ляссе, 1-й форзац
«Остров Индастри», ЗАО .....	Глава 3
«Прогрессивные технологии», ООО НПК .....	Глава 2
«Энви́ро-Хеми ГмбХ», ООО .....	Глава 15
Журнал «Пищевая промышленность» .....	Глава 10
Журнал «Мороженое и замороженные продукты» .....	Глава 5

# Содержание

Предисловие к русскому изданию .....	11
Предисловие .....	13
<b>1 РАСЧЕТЫ ТРУБОПРОВОДОВ ДЛЯ НЬЮТОНОВСКИХ И НЕНЬЮТОНОВСКИХ ЖИДКОСТЕЙ .....</b>	<b>15</b>
Содержание .....	15
1.1 Введение .....	16
1.2 Баланс механической энергии .....	16
1.3 Примеры расчетов .....	42
1.4 Профили скорости потока в трубе .....	47
1.5 Выбор оптимального диаметра трубопровода .....	51
Список обозначений .....	51
Литература .....	53
<b>2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СТЕРИЛИЗАЦИИ .....</b>	<b>55</b>
Содержание .....	55
2.1 Введение .....	56
2.2 Принципы термообработки .....	56
2.3 Термоустойчивость микроорганизмов .....	58
2.4 Теплообмен при термообработке .....	66
2.5 Расчеты термических процессов .....	77
Литература .....	93
<b>3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ЗАМОРАЖИВАНИЯ И РАСЧЕТ МОРОЗИЛЬНЫХ АППАРАТОВ .....</b>	<b>95</b>
Содержание .....	95
3.1 Введение .....	97
3.2 Виды морозильных устройств .....	98
3.3 Математическое описание процесса замораживания .....	107
3.4 Определение времени замораживания .....	109
3.5 Теплофизические свойства .....	113
3.6 Коэффициенты теплопередачи .....	122
3.7 Тепловые нагрузки .....	126
3.8 Экономические аспекты .....	130



3.9	Примеры расчетов .....	137
	Глоссарий .....	154
	Список обозначений .....	154
	Литература .....	155
<b>4</b>	<b>ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУШИЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ .....</b>	<b>159</b>
	Содержание .....	159
4.1	Введение .....	160
4.2	Основные положения .....	162
4.3	Балансы массы и энергии .....	171
4.4	Варианты применения .....	180
4.5	Выбор сушилки .....	200
	Литература .....	206
<b>5</b>	<b>РАЗРАБОТКА И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕМБРАННЫХ СИСТЕМ .....</b>	<b>209</b>
	Содержание .....	209
5.1	Введение .....	210
5.2	Основные принципы мембранного фильтрования .....	220
5.3	Проектирование мембранных систем .....	234
5.4	Работа мембранных систем .....	245
5.5	Применение мембран в пищевой промышленности .....	248
5.6	Экономические аспекты .....	252
	Список обозначений .....	258
	Литература .....	259
<b>6</b>	<b>УСТРОЙСТВО И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВЫПАРНЫХ АППАРАТОВ (ИСПАРИТЕЛЕЙ) .....</b>	<b>261</b>
	Содержание .....	261
6.1	Основные положения .....	262
6.2	Конструкции выпарных аппаратов и их применение .....	267
6.3	Коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи в выпарных аппаратах (испарителях) .....	279
6.4	Расчеты выпарных аппаратов (испарителей) .....	282
6.5	Эксплуатационная оценка промышленного выпарного аппарата для работы с цитрусовыми .....	293
6.6	Экономические аспекты .....	301
	Список обозначений .....	305
	Список сокращений .....	306
	Значения индексов .....	306
	Литература .....	306
<b>7</b>	<b>МАТЕРИАЛЬНЫЙ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНСЫ .....</b>	<b>309</b>
	Содержание .....	309
7.1	Введение в материальный и энергетический балансы в пищевой промышленности .....	310
7.2	Материальные балансы .....	319
7.3	Энергетические балансы .....	327
7.4	Связанные материальные и энергетические балансы .....	336
7.5	Экономические аспекты материальных и экономических балансов и некоторые выводы .....	342

Глоссарий .....	347
Литература .....	348
Дополнительная литература .....	350
<b>8 МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ УПАКОВКИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ .....</b>	<b>351</b>
Содержание .....	351
8.1 Введение .....	353
8.2. Пластмассы в процессе упаковки пищевых продуктов .....	360
8.3 Основные виды пластмасс .....	366
8.4 Добавки к пластмассам .....	395
8.5 Массообмен в упаковочных системах .....	405
Литература .....	428
<b>9 КИНЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССОВ ПОРЧИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРОКОВ ХРАНЕНИЯ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ .....</b>	<b>431</b>
Содержание .....	431
9.1 Введение .....	432
9.2 Кинетика процессов ухудшения качества пищевых продуктов .....	434
9.3 Применение кинетических методов для прогнозирования и контроля сроков хранения пищевых продуктов .....	464
9.4 Примеры использования кинетического моделирования .....	469
Литература .....	478
Дополнительная отечественная литература .....	486
<b>10 ДОПУСТИМЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ ПРИ СБЫТЕ И ПРОДАЖАХ .....</b>	<b>487</b>
Содержание .....	487
10.1 Введение .....	488
10.2 Качество замороженных пищевых продуктов .....	488
10.3 Моделирование изменений качества замороженных продуктов .....	497
10.4 Управление запасами с точки зрения логистики .....	502
Условные обозначения .....	508
Глоссарий .....	508
Дополнительная информация и ресурсы .....	509
Литература .....	510
<b>11 ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ И РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ .....</b>	<b>513</b>
Содержание .....	513
11.1 Введение .....	514
11.2 Теплофизические свойства .....	515
11.3 Реологические свойства .....	544
11.4 Прогнозирование и корреляция реологических свойств .....	554
11.5 Измерение вязкости и реометрия .....	559
11.6 Реологические свойства пищевых продуктов .....	564
Список обозначений .....	574
Значения индексов .....	575
Значения греческих символов .....	575
Литература .....	576



<b>12 СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ТЕСТА .....</b>	<b>581</b>
Содержание .....	581
12.1 Введение .....	582
12.2 Виды тестомесильных машин .....	585
12.3 Технические вопросы конструирования и работы тестомесильных машин .....	596
12.4 Основные сведения о раскатывании и слоении теста .....	602
Перечень обозначений .....	633
Литература .....	634
<b>13 ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ОЦЕНКИ ЗАТРАТ .....</b>	<b>635</b>
Содержание .....	635
13.1 Введение .....	636
13.2 Производственное предприятие .....	636
13.3 Оценка капитальных затрат .....	639
13.4 Оценка эксплуатационных затрат .....	649
13.5 Сравнение вариантов .....	652
13.6 Корректировка оценок во времени .....	654
13.7 Риски и неопределенность .....	655
13.8 Заключение .....	656
Дополнительная информация .....	657
Литература .....	657
Приложения .....	657
<b>14 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ .....</b>	<b>661</b>
Содержание .....	661
14.1 Введение .....	662
14.2 Компьютерное моделирование .....	662
14.3 Основы моделирования .....	663
14.4 Процедуры оптимизации .....	666
14.5 Нейронные сети .....	667
14.6 Программное обеспечение .....	668
14.7 Некоторые способы применения и примеры .....	669
14.8 Где получить дополнительную информацию .....	674
Литература .....	674
<b>15 ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ БЕЗРАЗБОРНОЙ МОЙКИ (CIP) .....</b>	<b>677</b>
Содержание .....	677
15.1 Введение .....	678
15.2 Основные принципы .....	681
15.3 Варианты применения .....	709
15.4 Экономические аспекты .....	739
15.5 Краткие выводы .....	742
Глоссарий .....	743
Использованные сокращения .....	744
Литература .....	745
<b>16 УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ .....</b>	<b>747</b>
Содержание .....	747
16.1 Введение .....	748
16.2 Модель технологического процесса .....	749

16.3	Элементы контура управления .....	749
16.4	Динамика технологического процесса .....	754
16.5	Режимы регулирования .....	756
16.6	Настройка регулятора .....	763
16.7	Методы регулирования .....	770
16.8	Аппаратура регулирования .....	781
16.9	Экономика управления технологическим процессом .....	783
16.10	Разработка системы регулирования .....	785
16.11	Примеры контуров регулирования .....	787
16.12	Заключение .....	790
	Список обозначений .....	790
	Литература .....	791
	Дополнительная отечественная литература .....	792
<b>17</b>	<b>ПИЩЕВАЯ ХИМИЯ ДЛЯ ИНЖЕНЕРОВ .....</b>	<b>793</b>
	Содержание .....	793
17.1	Введение .....	794
17.2	Химия нутриентов .....	795
17.3	Химические реакции при обработке пищевых продуктов .....	827
	Глоссарий .....	832
	Обозначения .....	833
	Литература .....	833
	Информация фирмы «Атлас Копко» .....	цв. вклейка в конце книги



# Предисловие к русскому изданию

Выход в свет на русском языке фундаментального справочника по пищевой инженерии представляется особенно актуальным в настоящее время, когда в отечественной пищевой промышленности все шире применяется зарубежное оборудование и сырье.

Пищевые продукты в разных странах и рационы питания существенно отличаются. Уровень их переработки зависит от конкретных социально-экономических условий, национальных традиций и привычек. Вместе с тем, наблюдаются общие тенденции — увеличение доли рафинированных, подвергнутых кулинарной обработке и подлежащих хранению пищевых продуктов, расширение области применения пищевых добавок, производство комбинированных пищевых продуктов, использование нетрадиционного пищевого сырья.

XX век внес коррективы в теоретические и практические аспекты переработки пищевых продуктов с учетом демографических изменений в обществе, наличия продовольственных ресурсов, особенностей трудовой деятельности, резкого ухудшения экологической ситуации, новой информации о значении различных компонентов пищи в питании человека. Пищевая инженерия в последнее время становится все более актуальной и в связи с развитием предприятий малых объемов переработки животного и растительного сырья, где один специалист отвечает и за технологию, и за оборудование, и за экономические аспекты производства. Не случайно Министерство образования РФ включило в перечень направлений специальностей особое направление 655800 — «Пищевая инженерия».

В последнее время выпущено немало специальной литературы по технологическим и техническим вопросам переработки сырья и продукции животного и растительного происхождения, однако по-прежнему наблюдается дефицит специальной литературы по общему направлению пищевой инженерии. Предлагаемый читателям справочник по пищевой инженерии, состоящий из 17 глав, — это первое издание, объединяющее общие теоретические и практические аспекты переработки пищевого сырья с примерами соответствующих расчетов, в котором особое значение придается разбору концепций превращений пищевых веществ в различных технологических процессах.

Отдельные главы справочника написаны разными авторами — специалистами в своей области, поэтому и переводчики, и научные редакторы глав старались сохранить стиль, логику и терминологию авторов, которые по некоторым аспектам отличаются от общепринятых в отечественной литературе. Вместе с тем, примеры расчетов, приведенные в конце глав, подтверждают практическую применимость предлагаемых методов и методик.

В справочнике изложены современные взгляды на практические вопросы переработки пищевого сырья, приведены технологические схемы и приемы, позволяющие снизить количественные и качественные потери в пищевой переработке. Как и во всей зарубежной литературе последних лет огромное внимание уделено повышению безопасности пищевых продуктов и производству «сбалансированных» продуктов питания в соответствии с требованиями санитарно-гигиенических норм.

Эта книга отличается ярко выраженной практической направленностью. Материал в ней изложен таким образом, что она будет востребована не только конструкторами и инженерами-проектировщиками пищевого оборудования, но и студентами, аспирантами, преподавателями и специалистами направлений 655800 «Пищевая инженерия», 655500 «Биотехнология», 655600 «Производство продуктов питания из растительного сырья», 655700 «Технология производства продуктов специального назначения и общественного питания», 655900 «Технология сырья и продуктов животного происхождения», 661800 «Технологические машины и оборудование», 552400 «Технология продуктов питания». Хотя методики и логика экономических расчетов в 13-й главе отличаются от принятых в отечественной практике, приведенные конкретные примеры и методы анализа соотношения «затраты/прибыль» безусловно будут интересны для студентов и аспирантов направления 060800 «Экономика и управление».

Естественно, что в одном справочнике невозможно рассмотреть все без исключения вопросы пищевых технологий, но объединение ключевых моментов технологического, механического, физико-химического направлений, вопросов процессов и аппаратов пищевых производств в одном издании определяет и практическую и научную ценность предлагаемой российскому читателю книги.

Издательство и редакционная коллегия справочника выражают глубокую признательность к. т. н. Ю. Г. Базарновой и к. т. н. Т. Е. Буровой, доцентам кафедры общей и холодильной технологии пищевых продуктов Санкт-Петербургского государственного университета низкотемпературных и пищевых технологий за помощь в организации подготовки книги к изданию.

*К. т. н., доцент, заведующий кафедрой общей  
и холодильной технологии пищевых продуктов,  
декан факультета пищевых технологий  
Санкт-Петербургского государственного университета  
низкотемпературных и пищевых технологий*

*А. Л. Ишевский*

# Предисловие

Тема пищевой инженерии в последние тридцать лет привлекает все большее внимание. Хотя высшие учебные заведения выпускают сравнительно мало специалистов по специальности «инженер пищевых производств», инженеры-практики предприятий пищевой промышленности составляют довольно существенную часть персонала. Значительный вклад инженеров пищевой промышленности проявляется в постоянно растущем потоке новых пищевых продуктов, в развитии технологии их производства, в серьезных проектах по улучшению технологических процессов, а также во все растущем потоке авторских свидетельств, патентов и публикаций.

Хотя за последнее время было выпущено немало серьезных книг по оборудованию пищевых производств, предлагаемая читателю «Пищевая инженерия» стоит особняком из-за своего акцента на практичность, на ее применимость в профессиональной деятельности инженеров. Она написана для инженеров-пищевиков и технологов. Вместе с тем сам факт, что эта книга предназначена для практического применения, делает ее полезным источником информации для учебного процесса в вузах и проектирования.

Довольно большая часть данного пособия посвящена общим технологическим вопросам пищевой промышленности. Каждый раздел призван обеспечить подробное и тщательное описание научных основ, вопросов их применения, примерных расчетов, а при возможности, и дать обзор экономических аспектов.

- Вводная глава посвящена одному из ключевых вопросов любого пищевого производства, а именно — проектированию систем трубопроводов и насосных систем. В разделе приведены математические расчеты по транспортировке жидких пищевых продуктов с ньютоновскими и неньютоновскими характеристиками потока. После освещения вопросов насосных систем рассматриваются отдельные проблемы сохранности пищевых продуктов. Возможность математического описания процесса стерилизации пищевых продуктов является основой для всех процессов розлива, и в последние двадцать лет в литературе появились некоторые новые подходы, позволяющие улучшить методы расчетов процессов стерилизации.
- В главе 2 приведены некоторые новейшие методы расчетов процессов стерилизации с примерами решения конкретных задач.
- Глава 3 — это полное описание холодильных технологий. В ней описаны проблемы изменения фазового состояния вещества с соответствующими математическими методами расчетов, на практике доказавшими свою состоятельность в предсказании сроков замораживания пищевых продуктов. За прошедшие тысячи лет для сохранения пищевых продуктов использовались также различные способы сушки, и поэтому бесполезными окажутся и количественные методы описания процесса сушки.
- В главе 4 изложены основы, помогающие понять различные глубинные механизмы типичных процессов сушки и обсуждаются некоторые упрощенные математические приемы проектирования сушилок для пищевых производств. На предприятиях пищевой промышленности концентрация пищевых продуктов осуществляется главным образом с помощью мембранных установок или испарителей, и за последние двадцать лет в проектировании новых типов мембран достигнуты значительные успехи.
- Глава 5 в связи этим посвящена обзору новейших достижений в области мембранных технологий, применяемых для сепарирования и концентрации продуктов.
- Предметом обсуждения в главе 6 является проектирование выпарных аппаратов, и методы, описанные в данной главе, будут полезны и при анализе работы уже существующих аппаратов.
- Одним из наиболее часто встречающихся расчетов при проектировании любого испарителя является расчет энергетического и материального баланса, в связи с чем в главе 7 приводятся примеры их расчетов применительно к пищевым технологиям.
- После процесса изготовления пищевой продукт для минимизации нежелательных изменений его качества должен быть расфасован и упакован, и для проектирования упаковочных

систем и правильного выбора упаковочных материалов необходимо знать их барьерную способность. Полный обзор применяемых обычно упаковочных материалов и их важнейших свойств приведен в главе 8.

- Упакованные пищевые продукты значительное время могут находиться в транспорте, на оптовых складах и предприятиях розничной торговли. Чтобы правильно предсказать срок годности любого пищевого продукта, необходимы серьезные исследования изменений свойств продукта при хранении, и приемы, используемые при проведении подобных исследований, описаны в главе 9.
- Среди различных факторов, влияющих на срок годности продукта, основную роль играет температура окружающей среды; для минимизации изменений качества продукта должна быть известна его температурная устойчивость. Влияние температуры на сроки годности пищевых продуктов рассматриваются в главе 10.
- При проектировании и оценке технологических процессов на пищевых производствах инженер основывается на знаниях физических и реологических свойств пищевых продуктов. В настоящее время опубликовано довольно много работ с экспериментальными данными в этой области, и в главе 11 дается полный обзор методов анализа физических и реологических свойств пищевых продуктов.
- Значение указанных свойств для проектирования технологических установок проиллюстрировано затем в главе 12 на примере систем для приготовления теста. Реология теста — вопрос очень сложный, и при проектировании систем для приготовления теста инженер должен полагаться на экспериментальные, прогностические и математические методы.

В последних пяти главах книги дан вспомогательный материал, который пригодится для расчетов любых установок, описанных в главах предыдущих.

- Так, например, при проектировании любых новых технологических систем одним из ключевых вопросов является расчет затрат и рентабельности. В главе 13 на конкретных примерах описаны некоторые полезные методы анализа соотношения «затраты/прибыль».
- Поскольку все более обыденным явлением стало появление на рабочих местах компьютеров, в пищевой промышленности все большее внимание уделяется процессам моделирования и оптимизации технологических процессов. Методы и процедуры, полезные в этой области, описаны в главе 14.
- В пищевой промышленности существует безусловное требование, чтобы любая установка соответствовала санитарно-гигиеническим нормам. Краткое описание проблем, которые необходимо учитывать, чтобы эти требования выполнялись, приведено в главе 15.
- Все более широкое применение в пищевой промышленности находят датчики технологического процесса, особенно в последнее время, когда на рынке появились новейшие сенсорные устройства. Возможные подходы к проектированию и применению технологических контрольно-измерительных устройств обсуждаются в главе 16.
- Инженеры, работающие в пищевой промышленности, должны знать основы тех наук, которых им приходится применять в своей практике, и одной из важнейших таких наук является пищевая химия. Поэтому в главе 17 мы даем обзор важнейших положений пищевой химии с особым упором на потребности инженеров-практиков.

Естественно, что хотя в данном пособии мы попытались объединить различные ключевые вопросы пищевых технологий, некоторые из них остались неосвещенными. Так, заслуживают отдельного рассмотрения проблемы экструзии, микроволновой обработки пищевых продуктов и некоторые другие, и мы надеемся, что наши читатели сами подскажут нам, в каких материалах они нуждаются. Это поможет нам учесть их замечания и подготовить новые издания «Пищевой инженерии».

*Энрике Ротштейн  
Р. Пол Сингх  
Кеннет Валентас*

# 1 РАСЧЕТЫ ТРУБОПРОВОДОВ ДЛЯ НЬЮТОНОВСКИХ И НЕНЬЮТОНОВСКИХ ЖИДКОСТЕЙ

*Джеймс Ф. Стеффе и Р. Пол Сингх*

*Перевод Д. Рапопорта под науч. ред. проф., д. т. н. Ю. И. Фадеева*

## Содержание

- 1.1 Введение
- 1.2 Баланс механической энергии
  - 1.2.1 Коэффициент трения
    - 1.2.1.1 *Ньютоновские жидкости*
    - 1.2.1.2 *Жидкости, подчиняющиеся степенному закону (псевдопластичные)*
    - 1.2.1.3 *Вязкопластичные жидкости по Бингаму (Bingham)*
    - 1.2.1.4 *Жидкости Гершеля–Балкли (Herschel–Bulkley)*
    - 1.2.1.5 *Обобщенный подход к расчетам перепада давления в трубопроводе*
  - 1.2.2 Оценка кинетической энергии
  - 1.2.3 Потери механической энергии на местных сопротивлениях
- 1.3 Примеры расчетов
  - 1.3.1 Пример 1: ньютоновская жидкость в ламинарном потоке
  - 1.3.2 Пример 2: ньютоновская жидкость в турбулентном потоке
  - 1.3.3 Пример 3: жидкость, подчиняющаяся степенному закону, в ламинарном потоке
  - 1.3.4 Пример 4: жидкость, подчиняющаяся степенному закону, в турбулентном потоке
  - 1.3.5 Пример 5: вязкопластичная жидкость по Бингаму в ламинарном потоке
  - 1.3.6 Пример 6: жидкость Гершеля–Балкли в ламинарном потоке
- 1.4 Профили скорости потока в трубе
  - 1.4.1 Ламинарный поток
  - 1.4.2 Турбулентный поток
    - 1.4.2.1 *Ньютоновские жидкости*
    - 1.4.2.2 *Жидкости, подчиняющиеся степенному закону*
- 1.5 Выбор оптимального диаметра трубопровода
- Список обозначений
- Литература
  - Дополнительная отечественная литература



## 1.1 Введение

Цель этой главы — дать практическую информацию, необходимую для предсказания падения давления потока независимых от времени гомогенных неньютоновских жидкостей в трубе. Основное применение данных материал может найти в конструировании трубопроводов и выборе насосных агрегатов. Дополнительную информацию по трубопроводным потокам зависимых от времени упруго-эластичных многофазных материалов можно найти в работах [3] и [14]. Подробное обсуждение информации о конструировании трубопроводов приводится в работе [26]. Методы оценки реологических свойств жидких пищевых продуктов изложены в работе [29], а типичные их характеристики приведены в табл. 1.1–1.3. Новые методы и приемы оценки реологических свойств продуктов описаны в работе [24].

## 1.2 Баланс механической энергии

Строгий вывод уравнения баланса механической энергии занимает много места и выходит за рамки наших задач (его можно найти в работе [1]). Данное уравнение является практической формой уравнения сохранения энергии (его можно получить энергетическим путем, добавив к уравнению Бернулли для невязкой (идеальной) жидкости член, учитывающий потерю напора (часть механической энергии, переходящей в теплоту и необратимо рассеивающейся. Из-за большой теплоемкости жидкого продукта повышение температуры ничтожно и может не учитываться [7])). Это уравнение обычно называют «инженерным уравнением Бернулли» [2, 7]. При его выводе присутствуют многочисленные допущения: плотность жидкости принимается постоянной; отсутствует воздействие тепловой энергии; все компоненты материала находятся в одной фазе; материал имеет единые свойства; эквивалентное давление одинаково.

Уравнение баланса механической энергии для несжимаемой жидкости можно записать в виде

$$W = \left( \frac{(\bar{u}_2)^2}{\alpha_2} - \frac{(\bar{u}_1)^2}{\alpha_1} \right) + g(z_2 - z_1) + \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \sum F, \quad (1.1)$$

где  $\sum F$  — сумма потерь по длине на трение. Эти потери связаны с касательными напряжениями. Второй член этой суммы (см. уравнение 1.2) характеризует потери на местных сопротивлениях и зависит главным образом от возникающего на них вихреобразования (потери от внезапного расширения и сужения потоков, потери на клапанах, фитингах и т. д.):

$$\sum F = \sum \frac{2f(\bar{u}_1)^2 L}{D} + \sum \frac{k_f(\bar{u}_2)^2}{2}, \quad (1.2)$$

а нижние индексы 1 и 2 обозначают два конкретных живых сечения в трубопроводе.

Таблица 1.1. Реологические свойства молочных, рыбных и мясных продуктов

Наименование продукта	$T, ^\circ\text{C}$	$n (-)$	$K, \text{Па} \cdot \text{с}^{-n}$	$\sigma, \text{Па}$	$\dot{\gamma}, \text{с}^{-1}$		
Сливки, жирность 10%	40	1,0	0,00148	—	—		
	60	1,0	0,00107	—	—		
	80	1,0	0,00083	—	—		
Сливки, жирность 20%	40	1,0	0,00238	—	—		
	60	1,0	0,00171	—	—		
	80	1,0	0,00129	—	—		
Сливки, жирность 30%	40	1,0	0,00395	—	—		
	60	1,0	0,00289	—	—		
	80	1,0	0,00220	—	—		
Сливки, жирность 40%	40	1,0	0,00690	—	—		
	60	1,0	0,00510	—	—		
	80	1,0	0,00395	—	—		
Рыбный паштет	3–6	0,91	8,55	1600,0	67–238		
Сырое мясо							
15 <sup>a</sup>	13 <sup>b</sup>	68,8 <sup>b</sup>	15	0,156	639,3	1,53	300–500
18,7	12,9	65,9	15	0,104	858,0	0,28	300–500
22,5	12,1	63,2	15	0,209	429,5	0	300–500
30,0	10,4	57,5	15	0,341	160,2	27,8	300–500
33,8	9,5	54,5	15	0,390	103,3	17,9	300–500
45,0	6,9	45,9	15	0,723	14,0	2,3	300–500
45,0	6,9	45,9	15	0,685	17,9	27,6	300–500
67,3	28,9	1,8	15	0,205	306,8	0	300–500
Молоко гомогенизированное	20	1,0	0,002000	—	—		
	30	1,0	0,001500	—	—		
	40	1,0	0,001100	—	—		
	50	1,0	0,000950	—	—		
	60	1,0	0,000775	—	—		
	70	1,0	0,00070	—	—		
	80	1,0	0,00060	—	—		
Молоко цельное	0	1,0	0,00344	—	—		
	5	1,0	0,00305	—	—		
	10	1,0	0,00264	—	—		
	20	1,0	0,00199	—	—		
	25	1,0	0,00170	—	—		
	30	1,0	0,00149	—	—		
	35	1,0	0,00134	—	—		
	40	1,0	0,00123	—	—		

а жирность, %;

б белки, %;

в влажность, %.

По [29], с разрешения издательства Freeman Press, East Lansing, MI.

Таблица 1.2. Реологические свойства маслоподобных пищевых продуктов

Продукт	СВ, %	T, °C	$n$ (-)	$K$ , Па · с <sup>n</sup>	$\sigma$ , Па	$\dot{\gamma}$ , с <sup>-1</sup>
Шоколад, молотый		46,1	0,574	0,57	1,16	
Мед:						
гречишный	18,6	24,8	1,0	3,86		
Голден Род	19,4	24,3	1,0	2,93		
полынный	18,6	25,9	1,0	8,88		
клеверный	17,0	24,7	1,0	7,20		
белый клеверный	18,2	25,2	1,0	4,80		
Майонез		25	0,55	6,4		30-1300
		25	0,60	4,2		40-1100
Горчица		25	0,39	18,5		30-1300
		25	0,34	27,0		40-1100
Растительное масло:						
касторовое		10	1,0	2,42		
		30	1,0	2,451		
		40	1,0	2,231		
		100	1,0	2,0169		
кукурузное		38	1,0	2,0317		
		25	1,0	2,0565		
хлопковое		20	1,0	2,0704		
		38	1,0	2,0306		
льняное		50	1,0	2,0176		
		90	1,0	2,0071		
оливковое		10	1,0	2,1380		
		40	1,0	2,0363		
		70	1,0	2,0124		
арахисовое		25,5	1,0	2,0656		
		38,0	1,0	2,0251		
		21,1	1,0	2,0647		0,32-64
		37,8	1,0	2,0387		0,32-64
		54,4	1,0	2,0268		0,32-64
рапсовое		0,0	1,0	2,530		
		20,0	1,0	2,163		
		30,0	1,0	2,096		
сафлоровое		38,0	1,0	2,0286		
		25,0	1,0	2,0522		
сезамное		38,0	1,0	2,0324		
соевое		30,0	1,0	2,0406		
		50,0	1,0	2,0206		
		90,0	1,0	2,0078		
подсолнечное		38,0	1,0	2,0311		

По [29], с разрешения издательства *Freeman Press, East Lansing, MI.*

Таблица 1.3. Реологические свойства пищевых продуктов из фруктов и овощей

Продукт	СВ, %	T, °C	n (-)	K, Па · с <sup>-n</sup>	γ, с <sup>-1</sup>
Из яблок:					
пюре	—	25,0	0,084	65,03	—
соус	11,6	27	0,28	12,7	160–340
	11,0	30	0,30	11,6	5–50
	11,0	82,2	0,30	9,0	5–50
	10,5	26	0,45	7,32	0,78–1260
	9,6	26	0,45	5,63	0,78–1260
	8,5	26	0,44	4,18	0,78–1260
Из абрикосов:					
пюре	17,7	26,6	0,29	5,4	—
	23,4	26,6	0,35	11,2	—
	41,4	26,6	0,35	54,0	—
	44,3	26,6	0,37	56,0	0,5–80
	51,4	26,6	0,36	108,0	0,5–80
	55,2	26,6	0,34	152,0	0,5–80
	59,3	26,6	0,32	300,0	0,5–80
консерв. по зрелости:					
зеленые	27,0	4,4	0,25	170,0	3,3–137
	27,0	25	0,22	141,0	3,3–137
зрелые	24,1	4,4	0,25	67,0	3,3–137
	24,1	25	0,22	54,0	3,3–137
недозрелые	25,6	4,4	0,24	85,0	3,3–137
	25,6	25	0,26	71,0	3,3–137
перезрелые	26,0	4,4	0,27	90,0	3,3–137
	26,0	25	0,30	67,0	3,3–137
Из бананов:					
пюре А	—	23,8	0,458	6,5	—
пюре В	—	23,8	0,333	10,7	—
пюре (17,7 Brix)	—	22	0,283	107,3	28–300
Из черники (для начинки пирогов)	—	20	0,426	6,08	3,3–530
Морковное пюре	—	25	0,228	24,16	—
Пюре из зеленых бобов	—	25	0,246	16,91	—
Пюре из гуавы (10,3 Brix)	—	23,4	0,494	39,98	14–400
Пюре из манго (9,3 Brix)	—	24,2	0,334	20,58	15–1000
Апельсиновый сок, концентр.	—				
Хемлин, ранний	—	25	0,585	4,121	0–500
(42,5 Brix)	—	15	0,602	5,973	0–500
	—	0	0,676	9,157	0–500
	—	-10	0,705	14,255	0–500

Таблица 1.3 (Продолжение)

Продукт	СВ, %	T, °C	$n$ (-)	$K$ , Па · с <sup>-n</sup>	$\dot{\gamma}$ , с <sup>-1</sup>
Хемлин, поздний (41,1 Brix)	-	25	0,725	1,930	0-500
	-	15	0,560	8,118	0-500
	-	0	0,620	1,754	0-500
	-	-10	0,708	13,875	0-500
Шишкообразный, ранний (40,3 Brix)	-	25	0,643	2,613	0-500
	-	15	0,587	5,887	0-500
	-	0	0,681	8,938	0-500
	-	-10	0,713	12,184	0-500
Шишкообразный, поздний (41,8 Brix)	-	25	0,532	8,564	0-500
	-	15	0,538	13,432	0-500
	-	0	0,636	18,584	0-500
	-	-10	0,629	36,414	0-500
Валенсия, ранний (43,0 Brix)	-	25	0,583	5,059	0-500
	-	15	0,609	6,714	0-500
	-	-10	0,619	27,16	0-500
Валенсия, поздний (41,9 Brix)	-	25	0,538	8,417	0-500
	-	15	0,568	11,802	0-500
	-	0	0,644	18,751	0-500
	-	-10	0,628	41,412	0-500
Наваль (65,1 Brix)	-	-18,5	0,71	29,2	-
	-	-14,1	0,76	14,6	-
	-	-9,3	0,74	10,8	-
	-	-5,0	0,72	7,9	-
	-	-0,7	0,71	5,9	-
	-	10,1	0,73	2,7	-
	-	29,9	0,72	1,6	-
	-	29,5	0,74	0,9	-
Папайя, пюре (7,3 Brix)	-	26,0	0,528	9,09	20-450
Из персиков:					
начинка для пирожков	-	20,0	0,46	20,22	1-140
пюре	10,9	26,6	0,44	0,94	-
	17,0	26,6	0,55	1,38	-
	21,9	26,6	0,55	2,11	-
	26,0	26,6	0,40	13,4	80-1000
	29,6	26,6	0,40	18,0	80-1000
	37,5	26,6	0,38	44,0	-
	40,1	26,6	0,35	58,5	2-300
	49,8	26,6	0,34	85,5	2-300
	58,4	26,6	0,34	440,0	-
	11,7	30,0	0,28	7,2	5-50
	11,7	82,2	0,27	5,8	5-50
	10,0	27,0	0,34	4,5	160-3200

Таблица 1.3 (Окончание)

Продукт	СВ, %	T, °C	$n$ (-)	$K$ , Па · с <sup>-n</sup>	$\dot{\gamma}$ , с <sup>-1</sup>
Из груши:					
пюре	15,2	26,6	0,35	4,25	—
	24,3	26,6	0,39	5,75	—
	33,4	26,6	0,38	38,5	80–1000
	37,6	26,6	0,38	49,7	—
	39,5	26,6	0,38	64,8	2–300
	47,6	26,6	0,33	120,0	0,5–1000
	49,3	26,6	0,34	170,0	—
	51,3	26,6	0,34	205,0	—
	45,8	32,2	0,479	35,5	—
	45,8	48,8	0,477	26,0	—
	45,8	65,5	0,484	20,0	—
	45,8	82,2	0,481	16,0	—
	14,0	30,0	0,35	5,6	5–50
	14,0	82,2	0,35	4,6	5–50
Из сливы:					
пюре	14,0	30,0	0,34	2,2	5–50
	14,0	82,2	0,34	2,0	5–50
Из тыквы:					
пюре А	—	25	0,149	20,65	—
пюре В	—	25	0,281	11,42	—
Из томатов:					
сок концентрированный	5,8	32,2	0,59	0,22	500–800
	5,8	38,8	0,54	0,27	500–800
	5,8	65,5	0,47	0,37	500–800
	12,8	32,2	0,43	2,0	500–800
	12,8	48,8	0,43	2,28	500–800
	12,8	65,5	0,34	2,28	500–800
	12,8	82,2	0,35	2,12	500–800
	16,0	32,2	0,45	3,16	500–800
	16,0	48,8	0,45	2,77	500–800
	16,0	65,5	0,40	3,18	500–800
	16,0	82,2	0,38	3,27	500–800
	25,0	32,2	0,41	12,9	500–800
	25,0	48,8	0,42	10,5	500–800
	25,0	65,5	0,43	8,0	500–800
	25,0	82,2	0,43	6,1	500–800
	30,0	32,2	0,40	18,7	500–800
	30,0	48,8	0,42	15,1	500–800
	30,0	65,5	0,43	11,7	500–800
	30,0	82,2	0,45	7,9	500–800

По [29], с разрешения издательства Freeman Press, East Lansing, MI.



## 1.2.1 Коэффициент трения

В данном разделе мы рассмотрим коэффициенты трения для ламинарных и турбулентных потоков жидкостей с независимыми от времени свойствами и критерии определения режима (ламинарного или турбулентного) потока. Здесь важно отметить, что в имеющихся технологических системах точно предсказать переход от ламинарного потока к турбулентному невозможно, и предлагаемые уравнения являются лишь своего рода «общими направлениями», которые можно использовать после тщательной оценки. Уравнения для коэффициента трения даются лишь для относительно длинных трубопроводов, применяемых, как правило, в системах мойки и очистки. Обсуждение вопросов турбулентного потока продуктов с высокими напряжениями сдвига (касательными напряжениями) ограничено в связи со следующими причинами: а) уравнения коэффициента трения и критерии турбулентности для подобных продуктов еще недостаточно проверены на практике; б) довольно трудно (и непрактично с экономической точки зрения) заставить жидкость с высоким напряжением сдвига течь в турбулентном режиме; в) данных о реологических характеристиках пищевых продуктов с высоким напряжением сдвига очень мало. Измерение напряжения сдвига в пищевых продуктах представляет для исследователей трудную задачу, причем эта проблема зачастую усложняется возникновением фактора зависимости от времени [29].

Коэффициент трения  $f$  по длине пропорционален отношению напряжения сдвига (касательного напряжения) на стенке в трубе к кинетической энергии на единицу объема:

$$f = \frac{2\sigma_w}{(\rho \bar{u}^2)}. \quad (1.3)$$

Рассмотрим условия равновесия (ускорения в потоке отсутствуют), действующего на выделенный объем жидкого продукта в трубопроводе с радиусом  $R$  и длиной  $L$ :

$$(P_1 - P_2)\pi R^2 = \sigma_w 2\pi RL = f \frac{\rho \bar{u}^2}{2} 2\pi RL, \quad (1.4)$$

откуда для комплекса  $\frac{P_1 - P_2}{\rho} = \frac{\delta P}{\rho}$  получим выражение:

$$\frac{(\delta P)}{\rho} = f \frac{2L\bar{u}^2}{D}. \quad (1.5)^1$$

<sup>1</sup> Потеря напора (падение давления по длине из-за трения, формулы 1.3 и 1.4), выражается формулой  $\delta P = f \rho \bar{u}^2 \frac{2L}{D}$  (а). В отечественной литературе принята формула  $\delta P = \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho \bar{u}^2}{2}$  (б), где  $\lambda$  — коэффициент потерь на трение по длине. Из сопоставления (а) и (б) следует, что  $\lambda = 4f$ .

Все формулы для коэффициента трения по длине  $f$  справедливы, начиная с участка трубопровода, в котором течение вязкой жидкости уже сформировалось. Формирование установившегося профиля ско-

Для описания поведения жидких пищевых продуктов существуют различные математические модели [22], но в настоящей книге рассматриваются лишь те из них, которые наиболее полезны для расчета падения давления в трубопроводах. Применять следует самую простую модель, адекватно описывающую поведение конкретного пищевого продукта, однако излишнее упрощение может привести к существенным ошибкам при расчетах [28].

### 1.2.1.1 Ньютоновские жидкости

Ньютоновские жидкости подчиняются реологическому закону  $\sigma = \mu \dot{\gamma} = \mu \frac{du}{dr}$ , где  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости.

Средняя скорость потока некоторой ньютоновской жидкости ( $\sigma = \mu \dot{\gamma}$ ) в ламинарном потоке в трубе равна

$$\bar{u} = \frac{Q}{\pi R^2} = \frac{1}{\pi R^2} \left( \frac{\pi (\delta P)}{8 L \mu} \right) = \frac{(\delta P) D^2}{32 L \mu}. \quad (1.6)$$

Решение уравнения 1.6 для перепада давления на элементе оборудования дает

$$\frac{(\delta P)}{L} = \frac{32 \bar{u} \mu}{D^2}. \quad (1.7)$$

Подставив уравнение (1.7) в формулу, определяющую коэффициент трения, получим выражение

$$f = \left[ \frac{(\delta P)}{L} \right] \left( \frac{D}{2 \rho \bar{u}^2} \right) = \left[ \frac{32 \bar{u} \mu}{D^2} \right] \left( \frac{D}{2 \rho \bar{u}^2} \right) = \frac{16}{N_{Re}}, \quad (1.8)$$

рости происходит в конце начального участка длиной  $L_{нач}$ . Длина начального участка для ламинарного течения ньютоновской жидкости может быть оценена по приближенной формуле  $L_{нач} = 0,057 Re \cdot D$ , где

$$Re = \frac{\rho \bar{u} D}{\mu} \text{ — число Рейнольдса.}$$

Потеря напора на трение на начальном участке  $\delta P_{нач} = \lambda \frac{L_{нач}}{D} \frac{\rho \bar{u}^2}{2} = 1,84 \frac{\bar{u}^2}{2}$ . Для турбулентного режи-

ма течения  $L_{нач} = (7,85 \lg Re - 4,40) D$ , а коэффициент сопротивления на этом участке  $\frac{1}{\sqrt{\xi_{нач}}} = 0,16 \lg Re^{-2}$ .

Здесь  $\xi_{нач}$  — коэффициент сопротивления в конце начального участка, равный  $\xi_{нач} = \left( \frac{u_{max}}{\bar{u}} \right)^2 - \alpha_k$  ( $\alpha_k = 2$ ).

Эти формулы, справедливые для ламинарного течения ньютоновской жидкости, приближенно могут быть использованы для оценки длины начального участка в случае течения неньютоновских жидкостей. Учет начального участка целесообразно производить лишь для относительно коротких трубопроводов. —  
Здесь и далее прим. науч. ред.

которое может быть использовано для прогнозирования коэффициентов трения в режиме ламинарного потока, где  $N_{Re} < 2100$  ( $N_{Re} = \rho D \bar{u} / \mu$ )<sup>1</sup>. При турбулентном потоке ( $N_{Re} > 4000$ ) рекомендуется использовать зависимость Кармана [2]:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4,0 \log_{10} (N_{Re} \sqrt{f}) - 0,4. \quad (1.9)^2$$

Для коэффициента трения в переходных условиях ( $2100 < N_{Re} < 4000$ ) не приводятся прогнозных зависимостей, но для определения соответствующих пределов можно использовать уравнения для ламинарного и турбулентного потоков.

### 1.2.1.2 Жидкости, подчиняющиеся степенному закону (псевдопластичные)

При проектировании трубопроводов для неньютоновских жидкостей наиболее важной оказывается модель жидкостей, подчиняющихся степенному закону ( $\sigma = K(\dot{\gamma})^n$ ) ( $\sigma = K(\dot{\gamma})^n$ ). Она достаточно хорошо изучена и довольно точно отражает поведение многих жидкостей, отличающихся своим поведением при сдвиге ( $0 < n < 1$ ). Средняя скорость потока определяется зависимостью:

$$\bar{u} = \frac{Q}{\pi R^2} \left[ \pi \left( \frac{(\delta P)}{2LK} \right)^{\frac{1}{n}} \left( \frac{n}{3n+1} \right) R^{(3n+1)/n} \right] \left[ \frac{1}{\pi R^2} \right], \quad (1.10)$$

где  $Q$  — объемный расход жидкости.

Отсюда для  $\frac{\delta P}{L}$  может быть записано выражение

$$\frac{(\delta P)}{L} = \frac{4\bar{u}^n K}{D^{1+n}} \left( \frac{2+6n}{n} \right)^n, \quad (1.11)$$

что после подстановки в уравнение (1.4) приводит к зависимости для  $f$ , аналогичной по структуре формуле (1.8):

$$f = \left[ \frac{\delta P}{L} \right] \left( \frac{D}{2\rho \bar{u}^2} \right) = \left[ \left( \frac{4\bar{u}^n K}{D^{1+n}} \right) \left( \frac{2+6n}{n} \right)^2 \right] \left( \frac{D}{2L\bar{u}^2} \right) = \frac{a}{N_{Re,PL}^b}, \quad (1.12)$$

<sup>1</sup>  $N_{Re}$  — число Рейнольдса. В отечественной литературе оно обозначается как  $Re$ .

<sup>2</sup> Для оценки величины  $f$  при турбулентном движении можно также рекомендовать степенную формулу Блазиуса

$$f = \frac{0,079}{(Re)^{1/4}}. \quad (1.9a)$$

где число Рейнольдса для степенного закона определяется как

$$N_{Re,PL} = \left( \frac{8D^n (\bar{u})^{2-n} \rho}{K} \right) \left( \frac{n}{2+6n} \right)^n = \left( \frac{D^n (\bar{u})^{2-n} \rho}{8^{n-1} K} \right) \left( \frac{4n}{3n+1} \right)^n. \quad (1.13)$$

В этих формулах  $K$  — кажущаяся вязкость (размерность —  $\text{Па} \cdot \text{с}^n$ ) (см. табл. 1.1).

Экспериментальные данные (табл. 1.4) показывают, что для многих материалов, подчиняющихся степенному закону, уравнение (1.12) немного увеличивает коэффициент трения. Это, возможно, происходит из-за некоторого скольжения продукта у стенок или изменений реологических свойств во времени, которые могут проявляться у пищевых продуктов типа суспензий или эмульсий.

Уравнение (1.12) соответствует ламинарному потоку в том случае, если соблюдается следующее неравенство [14]:

$$N_{Re,PL} < \frac{6464n}{(1+3n)^2 (1/(2+n))^{(2+n)/(1+n)}} = (N_{Re,PL})_{\text{критическое}}. \quad (1.14)$$

Критическое число Рейнольдса —  $(N_{Re,PL})_{\text{критическое}}$  существенно меняется в зависимости от  $n$  (рис. 1.1) и достигает своего максимума при значениях  $n$  около 0,4.

Если условия уравнения (1.14) не удовлетворяются,  $f$  для условий турбулентного потока можно получить, используя уравнение, предложенное в работе [8]:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \left( \frac{4}{n^{0,75}} \right) \log_{10} \left[ (N_{Re,PL}) f^{(1-(n/2))} \right] - \left( \frac{0,4}{n^{1,2}} \right). \quad (1.15)$$

**Таблица 1.4. Корреляция коэффициента трения для пищевых продуктов с потоком, подчиняющимся степенному закону, при ламинарном движении;  $f = aN_{Re,PL}^b$**

Пищевой(ые) продукт(ы)	$a^*$	$b^*$	Источник
Идеальный степенной закон	16,0	-1,00	Теоретические выводы
Мякоть ананаса	13,6	-1,00	[25]
Абрикосовое пюре	12,4	-1,00	[25]
Апельсиновый концентрированный сок	14,2	-1,00	[25]
Яблочное пюре	11,7	-1,00	[25]
Горчица	12,3	-1,00	[25]
Майонез	15,4	-1,00	[25]
Яблочный концентрированный сок	18,4	-1,00	[25]
Сводные данные по томатному концентрированному соку и яблочному пюре	29,1	-0,992	[19]
Яблочное пюре	14,14	-1,05	[30]

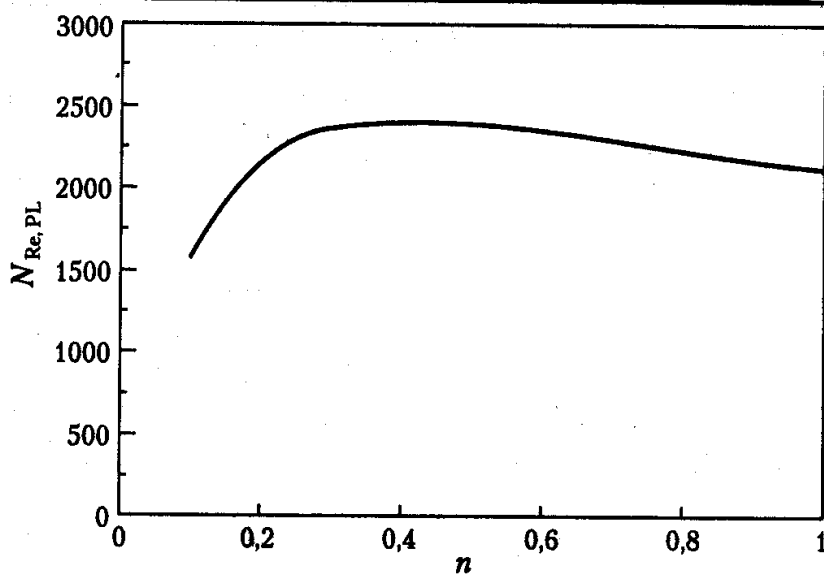


Рис. 1.1. Критическое значение числа Рейнольдса для жидкостей, подчиняющихся степенному закону, при различных значениях показателя степени  $n$

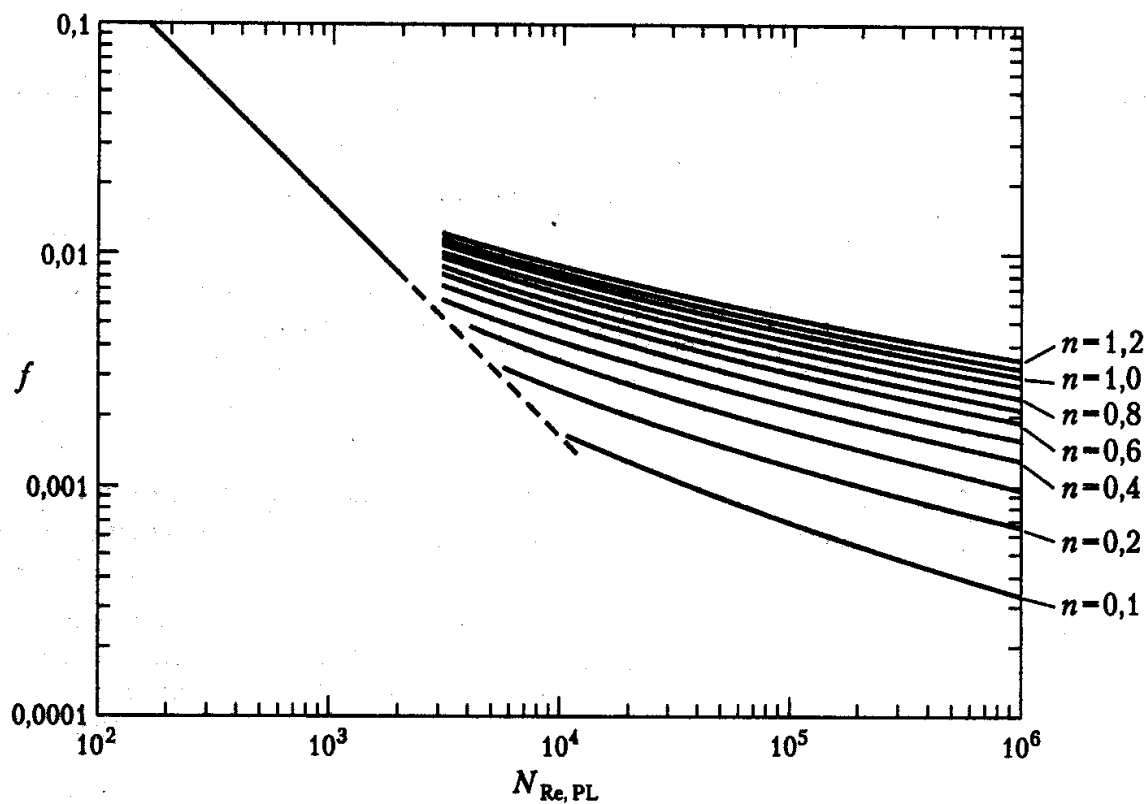


Рис. 1.2. Коэффициент трения  $f$  для жидкостей, подчиняющихся степенному закону, выведенный из формулы Доджа и Метцнера [8].  
По [10]

Это несложное уравнение дает хорошие результаты (см. [12]). Графическое его решение (рис. 1.2) иллюстрирует зависимость коэффициента трения от величины показателя степени  $n$ .

### 1.2.1.3 Вязкопластичные жидкости по Бингаму (Bingham)<sup>1</sup>

Используя подход, аналогичный примененному для псевдопластичных жидкостей, падение давления на единицу длины у вязкопластичных жидкостей по Бингаму можно рассчитать через объемный расход жидкости  $Q$ :

$$\frac{(\delta P)}{L} = \left( \frac{8Q\mu_{PL}}{\pi R^4} \right) \left( \frac{1}{1 - 4c/3 + c^4/3} \right). \quad (1.16)$$

Записав уравнение 1.16 в единицах средней скорости потока, получим

$$\frac{(\delta P)}{L} = \left( \frac{32\bar{u}\mu_{PL}}{D^2} \right) \left( \frac{1}{1 - 4c/3 + c^4/3} \right). \quad (1.17)$$

Подставив эту формулу в уравнение (1.4), имеем

$$\begin{aligned} f = \left[ \frac{(\delta P)}{L} \right] \left( \frac{D}{2\rho(\bar{u})^2} \right) &= \left[ \left( \frac{32\bar{u}\mu_{PL}}{D^2} \right) \left( \frac{1}{1 - 4c/3 + c^4/3} \right) \right] \left( \frac{D}{2\rho(\bar{u})^2} \right) = \\ &= \frac{16\mu_{PL}}{D\bar{u} - \rho} \left( \frac{1}{1 - 4c/3 + c^4/3} \right), \end{aligned} \quad (1.18)$$

где  $c$  — функция, характеризующая пластические свойства продукта,

$$c = \frac{\sigma_0}{\sigma_w} = \frac{4L\sigma_0}{D\delta P} = \frac{2\sigma_0}{f\rho(\bar{u})^2}. \quad (1.19)$$

Коэффициент трения можно также записать в терминах числа Бингама–Рейнольдса ( $N_{Re,B}$ ) и числа Хедстрёма ( $N_{He}$ ) [14]:

$$\frac{1}{N_{Re,B}} = \frac{f}{16} - \frac{N_{He}}{6(N_{Re,B})^2} + \frac{(N_{He})^4}{3F^3(N_{Re,B})^8}, \quad (1.20)$$

<sup>1</sup> Реологическое уравнение для этих жидкостей —  $\sigma = \mu_{pl}\dot{\gamma} + \sigma_0$ , где  $\sigma_0$  — предел текучести при сдвиге. Течение таких жидкостей начинается после того, как будет преодолен предел текучести  $\mu_{pl}\dot{\gamma}$  — вязкое касательное напряжение, пропорциональное первой степени относительной скорости сдвига  $\dot{\gamma} = \frac{du}{dr}$ , то есть подчиняющееся закону течения ньютоновской жидкости. В силу последнего можно считать, что  $\mu_{PL} = \mu$ .

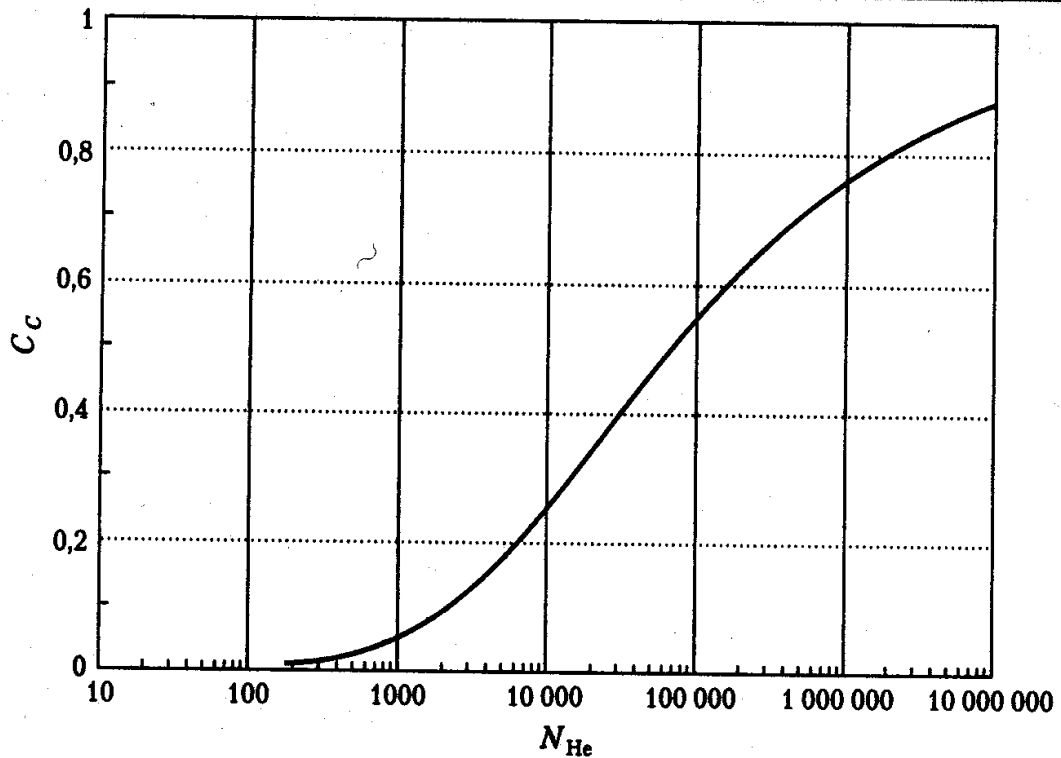


Рис. 1.3. Изменение  $c_c$  в зависимости от изменения числа Хедстрема ( $N_{He}$ ) для ламинарного потока вязкопластичных жидкостей Бингама (по [29])

где

$$N_{He} = \frac{D^2 \sigma_0 \rho}{(\mu_{PL})^2}, \quad (1.21)$$

а

$$N_{Re,B} = \frac{D \bar{u} \rho}{\mu_{PL}}. \quad (1.22)$$

Уравнения (1.18) или (1.20) можно использовать для оценки  $f$  в устойчивом ламинарном потоке, наблюдающемся при выполнении условий следующего неравенства [15]:

$$N_{Re,B} \leq \frac{N_{He}}{8c_c} \left( 1 - \frac{4}{3}c_c + \frac{1}{3}c_c^4 \right) = (N_{Re,B})_{\text{критическое}}, \quad (1.23)$$

где  $c_c$  — критическое значение  $c$ , определяемое как

$$\frac{c_c}{(1 - c_c)^3} = \frac{N_{He}}{16800}, \quad (1.24)$$

причем  $c_c$  изменяется (рис. 1.3) от 0 до 1, а критическое значение числа Бингама-Рейнольдса увеличивается вместе с увеличением числа Хедстрема (рис. 1.4).



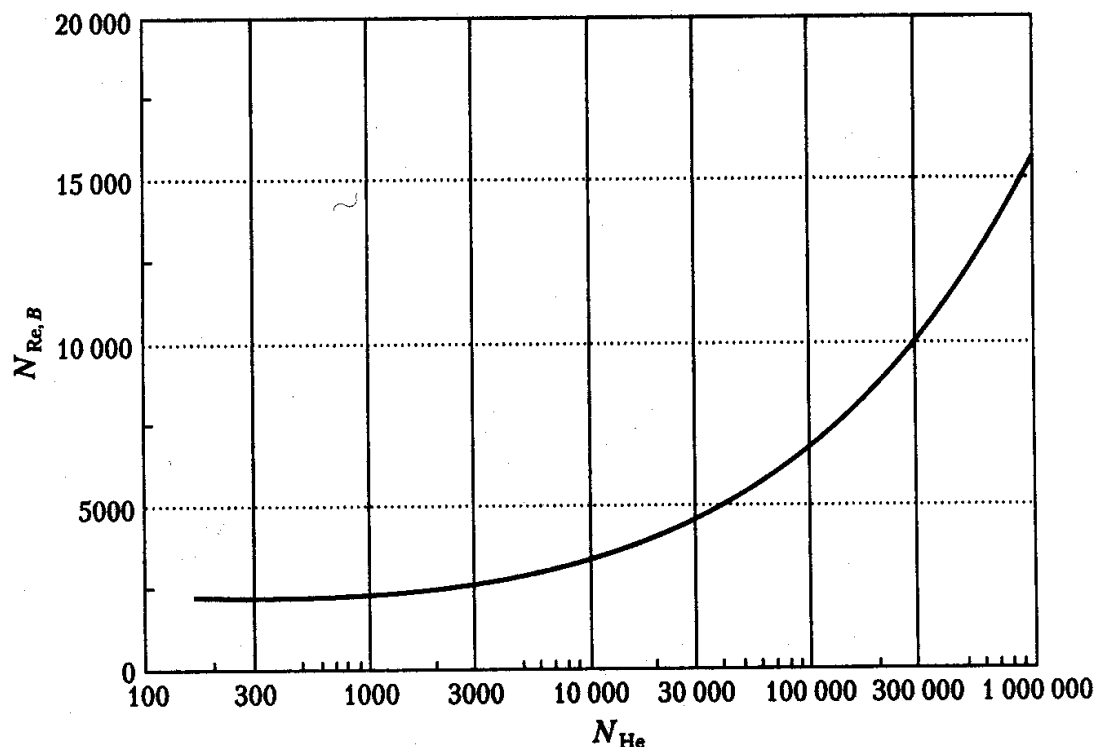


Рис. 1.4. Изменение критического значения числа Бингама–Рейнольдса ( $N_{Re,B}$ ) в зависимости от изменения числа Хедстрома ( $N_{He}$ ) (по [29])

Коэффициент трения для турбулентного потока вязкопластичных жидкостей Бингама можно рассматривать как частный случай жидкости Гершеля–Балкли (Herschel–Bulkley) с использованием уравнения Торранса [32]:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4,53 \log_{10}(1-c) + 4,53 \log_{10}((N_{Re,B})\sqrt{f}) - 2,3. \quad (1.25)$$

Увеличение значений общего напряжения существенно увеличивает коэффициент трения (рис. 1.5). В турбулентном потоке при больших значениях  $c$  уравнение 1.25 может быть упрощено:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4,53 \log_{10}(N_{Re,B}\sqrt{f}) - 2,3. \quad (1.26)$$

#### 1.2.1.4 Жидкости Гершеля–Балкли (Herschel–Bulkley)<sup>1</sup>

Коэффициент трения для ламинарного потока жидкостей Гершеля–Балкли можно рассчитать по уравнению, предложенному Хэнксом [16] и обобщенному в [12]:

$$f = \frac{16}{\Psi N_{Re,PL}}^*, \quad (1.27)$$

<sup>1</sup> Эти жидкости подчиняются реологическому закону  $\sigma = K(\dot{\gamma}^n) + \sigma_0$ , то есть отличаются от предыдущего рассмотренного случая нелинейной характеристикой вязкой компоненты.

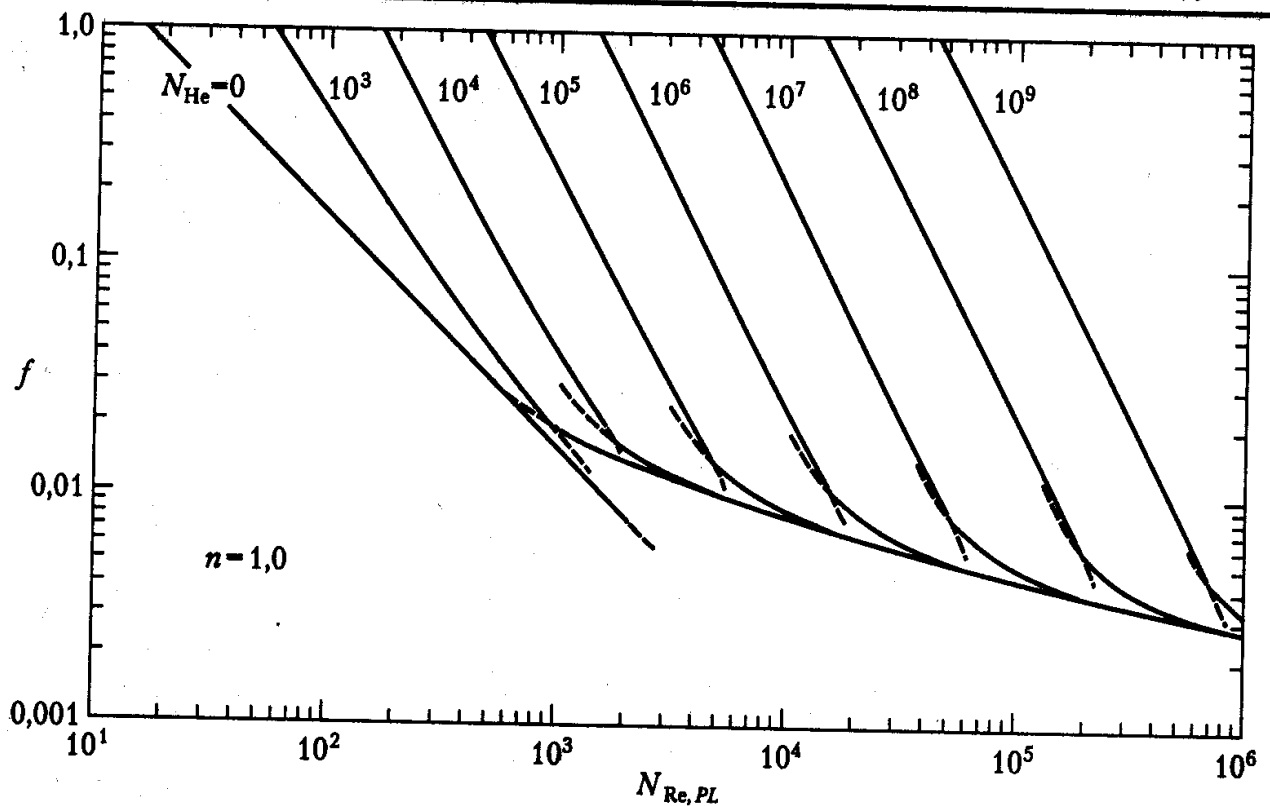


Рис. 1.5. Коэффициент трения ( $f$ ) для вязкопластичных жидкостей Бингама ( $N_{Re,B}$ ) по уравнению Торранса [32] (по [10])

где

$$\psi = (1+3n)^n (1-c)^{1+n} \left[ \frac{(1-c)^2}{(1+3n)} + \frac{2c(1-c)}{(1+2n)} + \frac{c^2}{(1+n)} \right]^n. \quad (1.28)$$

При этом  $c$  можно выразить в виде функции от  $N_{Re,PL}$  и модифицированного вида числа Хедстрема ( $N_{He,M}$ ):

$$N_{Re,PL} = 2N_{He,M} \left( \frac{n}{1+3n} \right)^2 \left( \frac{\psi}{c} \right)^{\frac{2-n}{n}}, \quad (1.29)$$

где

$$N_{Re,M} = \frac{D^2 \rho}{K} \left( \frac{\sigma_0}{K} \right)^{\frac{2-n}{n}}. \quad (1.30)$$

Чтобы найти  $f$  для жидкостей Гершеля–Балкли,  $c$  выражают через итерацию по уравнению (1.29) с помощью уравнения (1.28), и в этом случае коэффициент трения может быть рассчитан непосредственно из уравнения (1.27). Для облегчения расчетов бывает полезно провести графическое решение (рис. 1.6–1.15), где цифры пока-

зывают значение критического числа Рейнольдса при различных значениях  $N_{\text{He},M}$  для конкретных значений  $n$ . Критическое число Рейнольдса основано на теоретических положениях и пока что не имеет практического (экспериментального) подтверждения. Рис. 1.6 (для  $n = 1$ ) является также решением для частного случая вязкопластичной жидкости Бингама и хорошо соотносится с данными Торранса [32], представленными на рис. 1.5.

### 1.2.1.5 Обобщенный подход к расчетам перепада давления в трубопроводе

Такой обобщенный подход для соотнесения скорости потока и перепада давления при ламинарном потоке жидкостей, не изменяющихся со временем, представлен в работе Метцнера [21]. Общее уравнение имеет вид

$$\frac{(\delta P)R}{2L} = K' \left( \frac{4Q}{\pi R^3} \right)^{n'}, \quad (1.31)$$

где

$$n' = \frac{d \ln((\delta P)R/2L)}{d \ln(4Q/\pi R^3)}. \quad (1.32)$$

Это выражение сходно с уравнением (1.10) для жидкостей, подчиняющихся степенному закону. В случае жидкостей, подчиняющихся степенному закону,

$$n' = n \text{ и } K' = K \left( \frac{1+3n}{4n} \right)^n. \quad (1.33)$$

В общем виде  $n'$  может изменяться в зависимости от изменения напряжения сдвига у стенок, и ее величину следует оценивать для каждого значения  $\sigma_w$ . При оценке экспериментальных расчетов по вязкости для труб небольшого диаметра или для случаев, когда неприменима хорошо известная реологическая модель (жидкости, подчиняющиеся степенному закону, вязкопластичные жидкости Бингама или жидкости Гершеля–Балкли), уравнение (1.31) имеет большое практическое значение. Аналогичный метод для решения задачи в случае турбулентного потока жидкостей, свойства которых зависят от времени, приводится в работе [20].

Поведение жидкостей, меняющееся со временем, и их торможение также можно включить в расчет падения давления в трубопроводах. Пример использования подобного подхода для прокачивания мясного фарша приведен в работе [17], где в коэффициент  $K$  включены изменения свойств продукта со временем, а также изменения его свойств, связанные с подтормаживанием у стенок<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Конечной целью при расчете трубопроводов является определение мощности насоса, который бы создавал на выходе вытекание жидкости с массовым расходом  $Q_m = \rho Q$  со скоростью  $\bar{u}_2$ . Номинальная мощность насоса, способного обеспечить требуемый массовый расход, задается формулой

$N_{\text{ном}} = \left( \frac{\delta P}{\rho} \right) \rho Q$  (Вт). Требуемая мощность насоса равна  $N = \frac{N_{\text{ном}}}{\eta}$ , где  $\eta$  — коэффициент полезного действия, изменяющийся приблизительно в пределах 0,6–0,7.

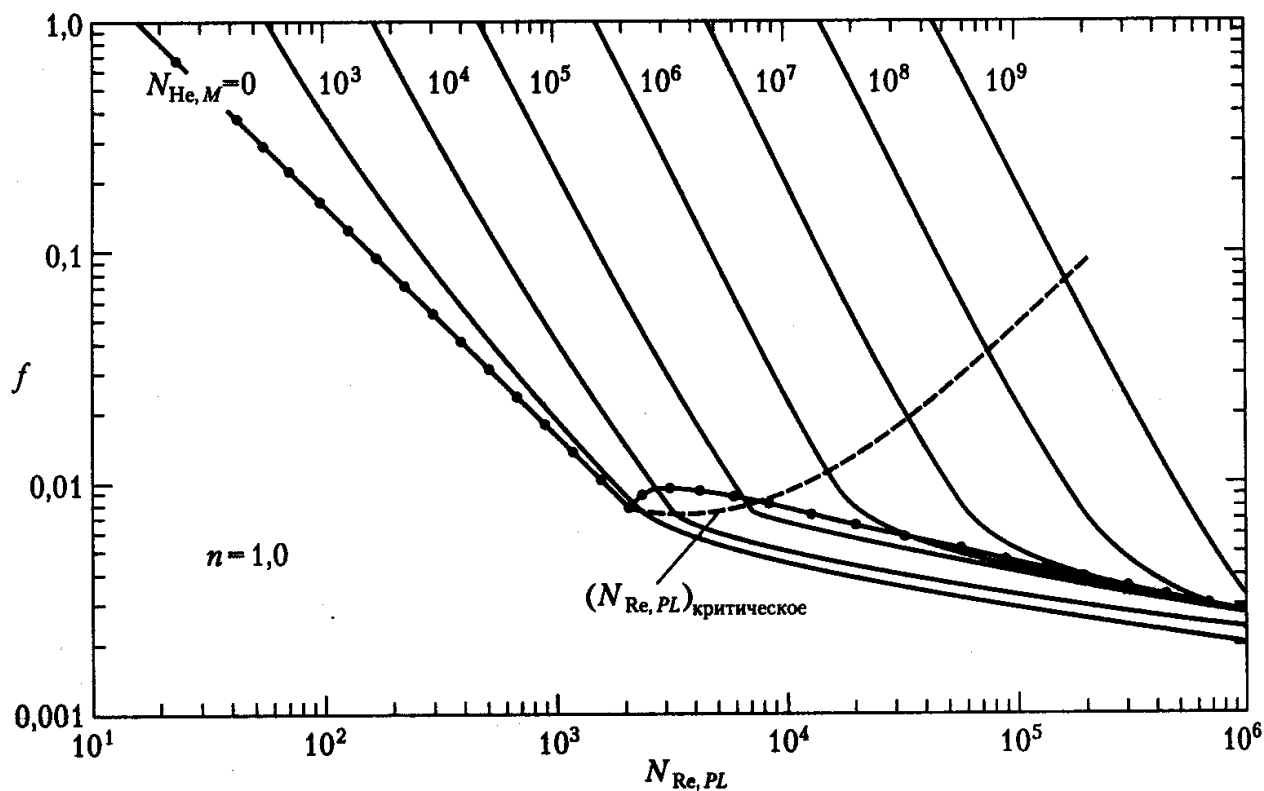


Рис. 1.6. Коэффициент трения  $f$  для жидкостей Гершеля–Балкли при  $n = 1$ , основанный на зависимости Хэнкса (Hanks) [16] (по [10])

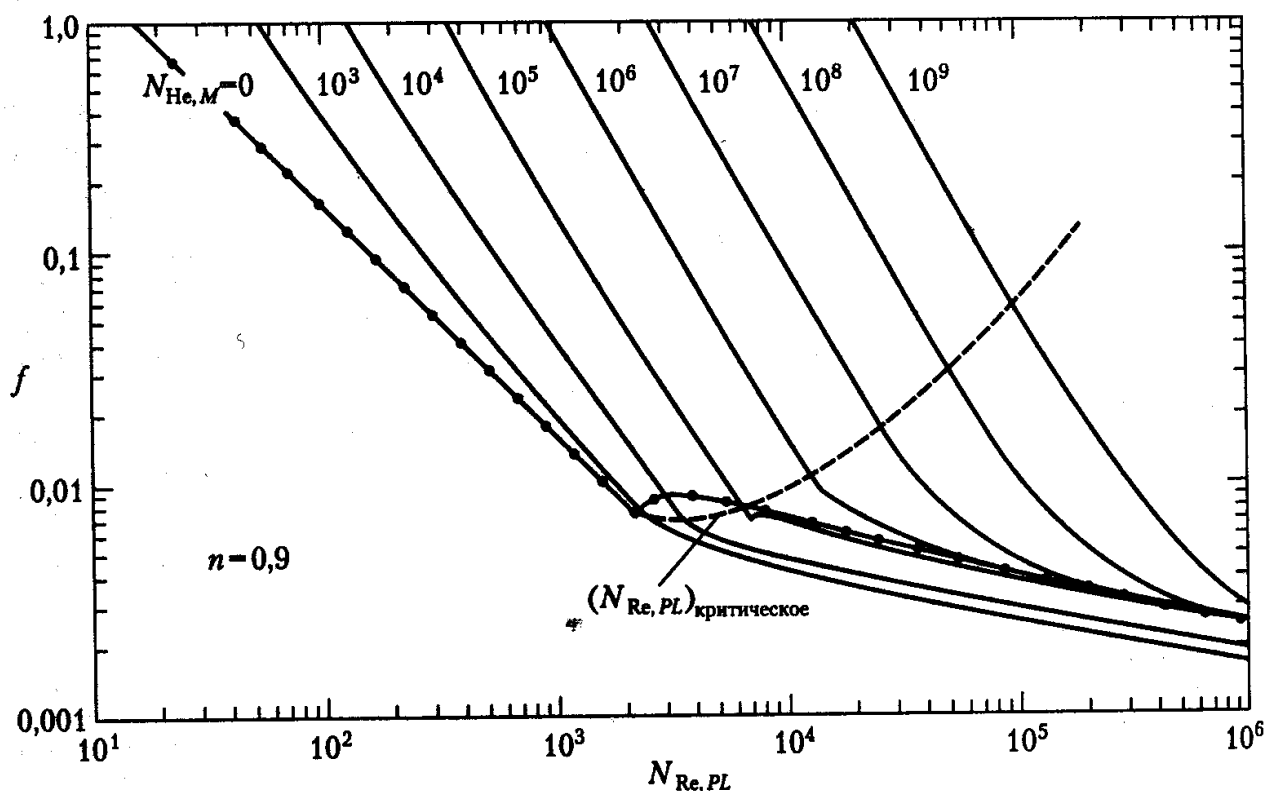


Рис. 1.7. Коэффициент трения  $f$  для жидкостей Гершеля–Балкли при  $n = 0.9$ , основанный на зависимости Хэнкса (Hanks) [16] (по [10])

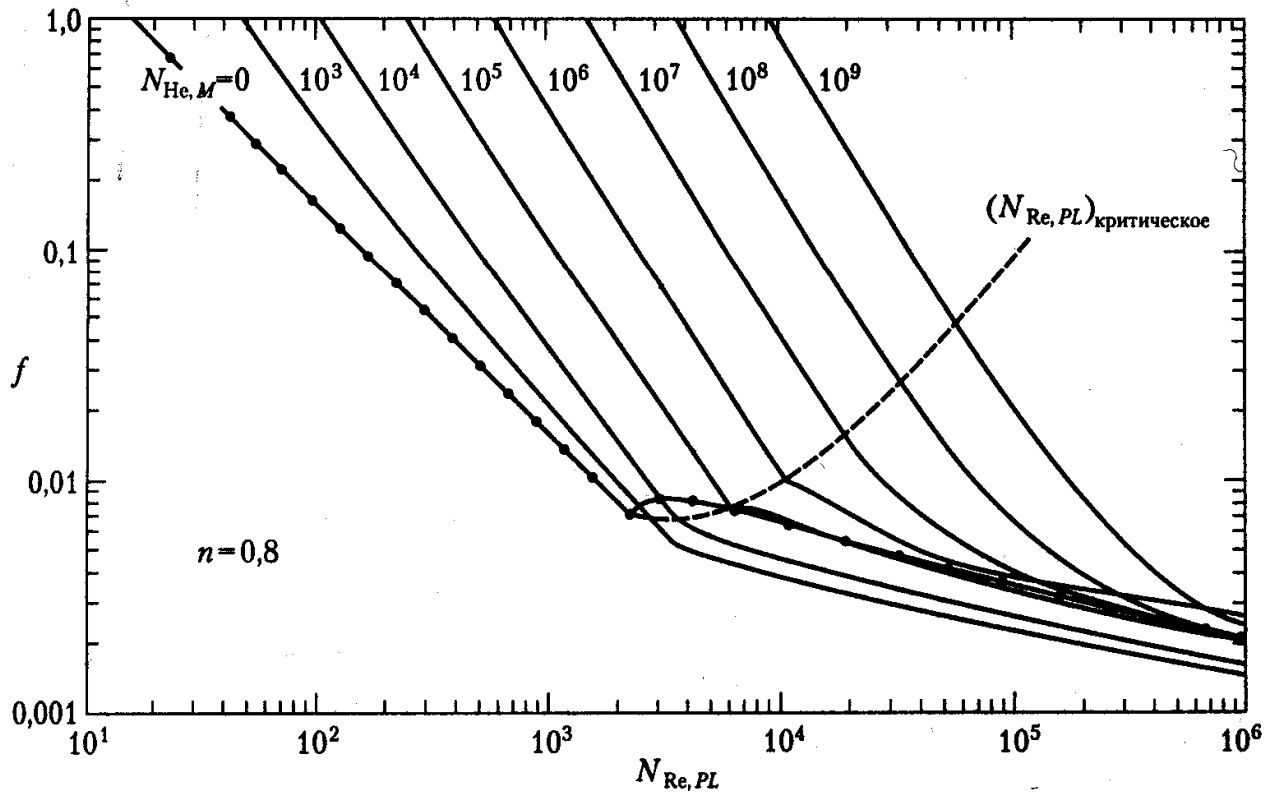


Рис. 1.8. Коэффициент трения  $f$  для жидкостей Гершеля–Балкли при  $n = 0,8$ , основанный на зависимости Хэнкса (Hanks) [16] (по [10])

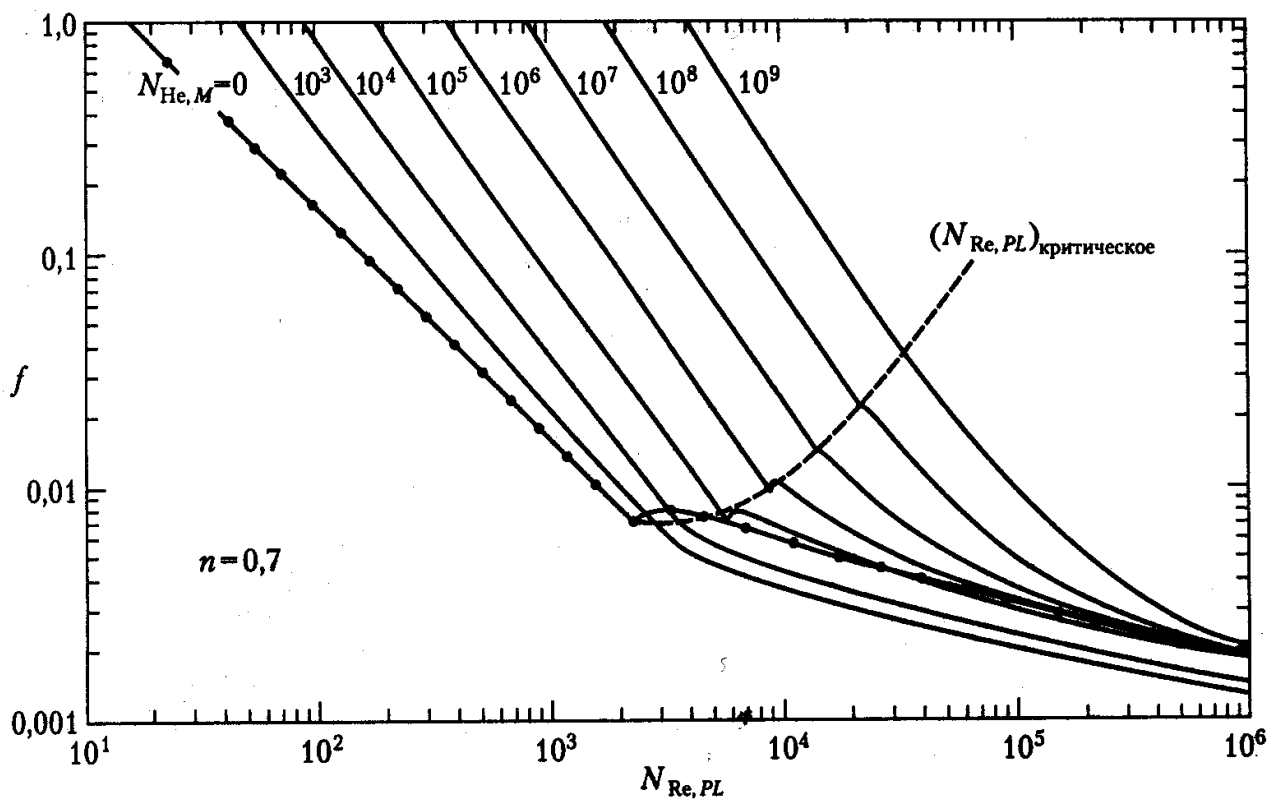


Рис. 1.9. Коэффициент трения  $f$  для жидкостей Гершеля–Балкли при  $n = 0,7$ , основанный на зависимости Хэнкса (Hanks) [16] (по [10])

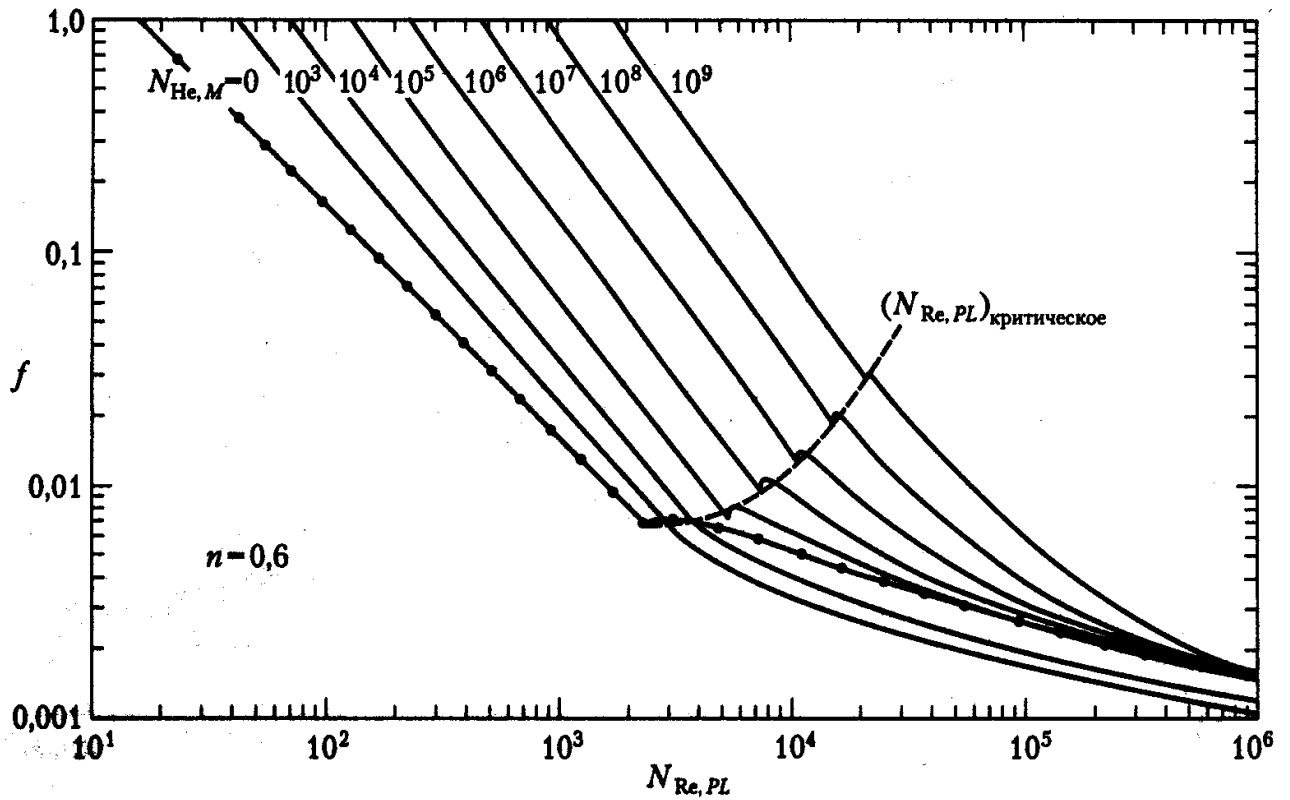


Рис. 1.10. Коэффициент трения  $f$  для жидкостей Гершеля–Балкли при  $n = 0,6$ , основанный на зависимости Хэнкса (Hanks) [16] (по [10])

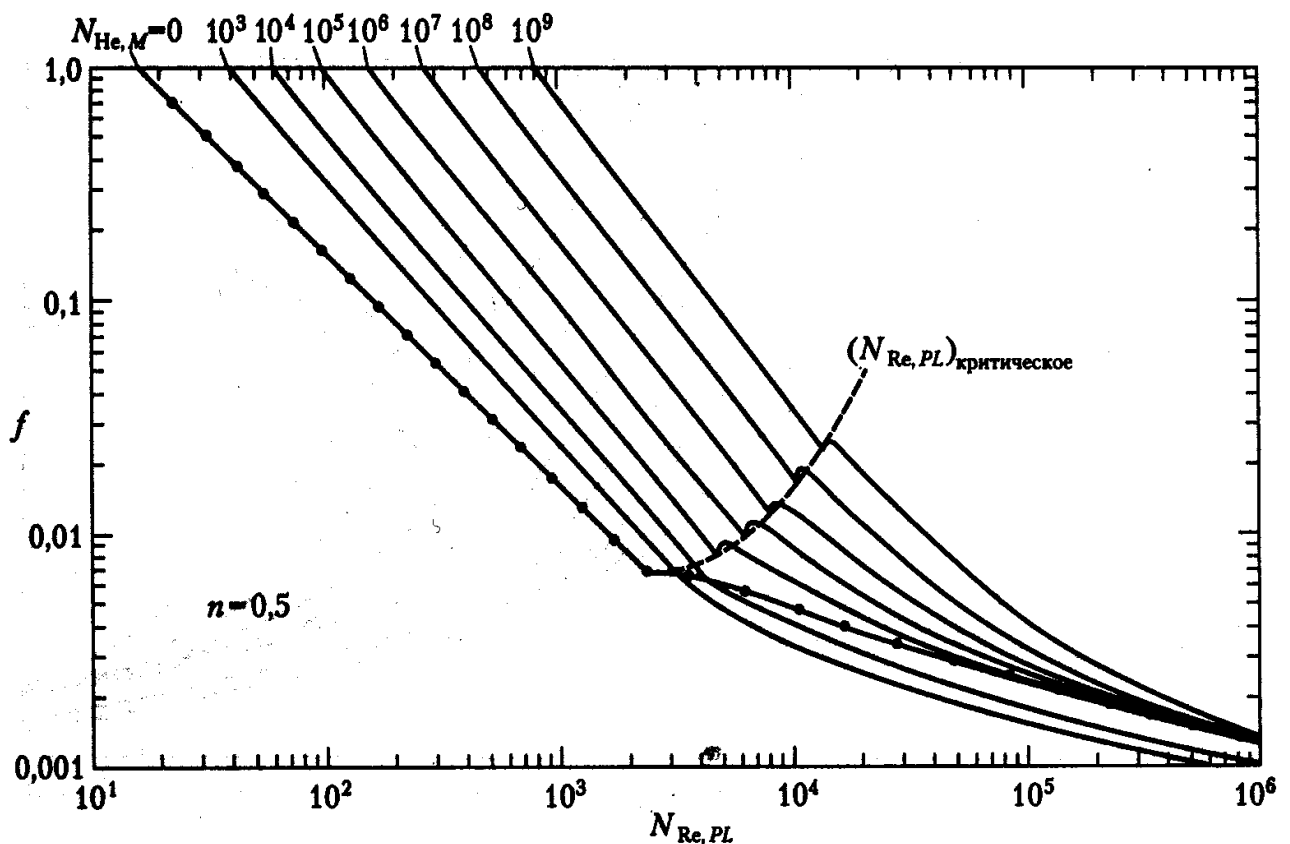


Рис. 1.11. Коэффициент трения  $f$  для жидкостей Гершеля–Балкли при  $n = 0,5$ , основанный на зависимости Хэнкса (Hanks) [16] (по [10])

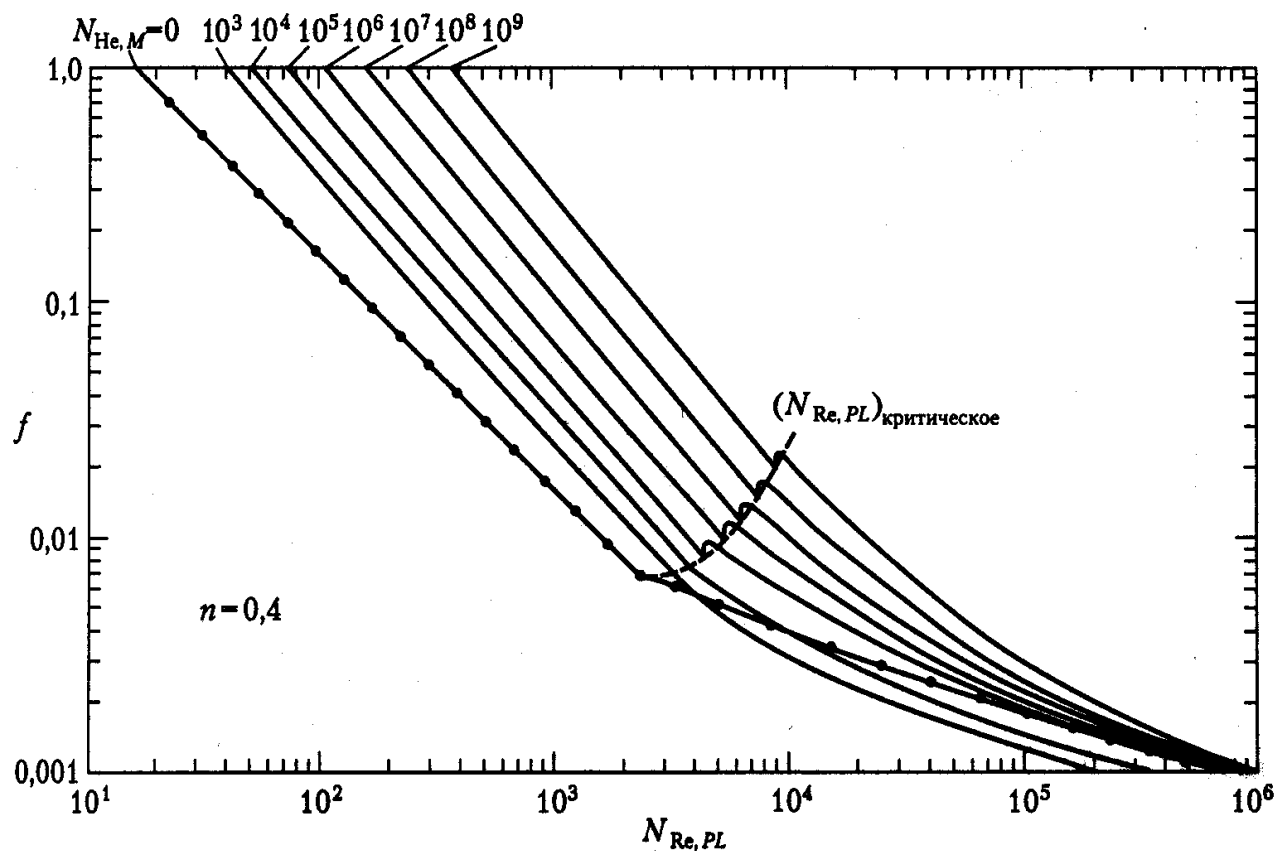


Рис. 1.12. Коэффициент трения  $f$  для жидкостей Гершеля–Балкли при  $n = 0,4$ , основанный на зависимости Хэнкса (Hanks) [16] (по [10])

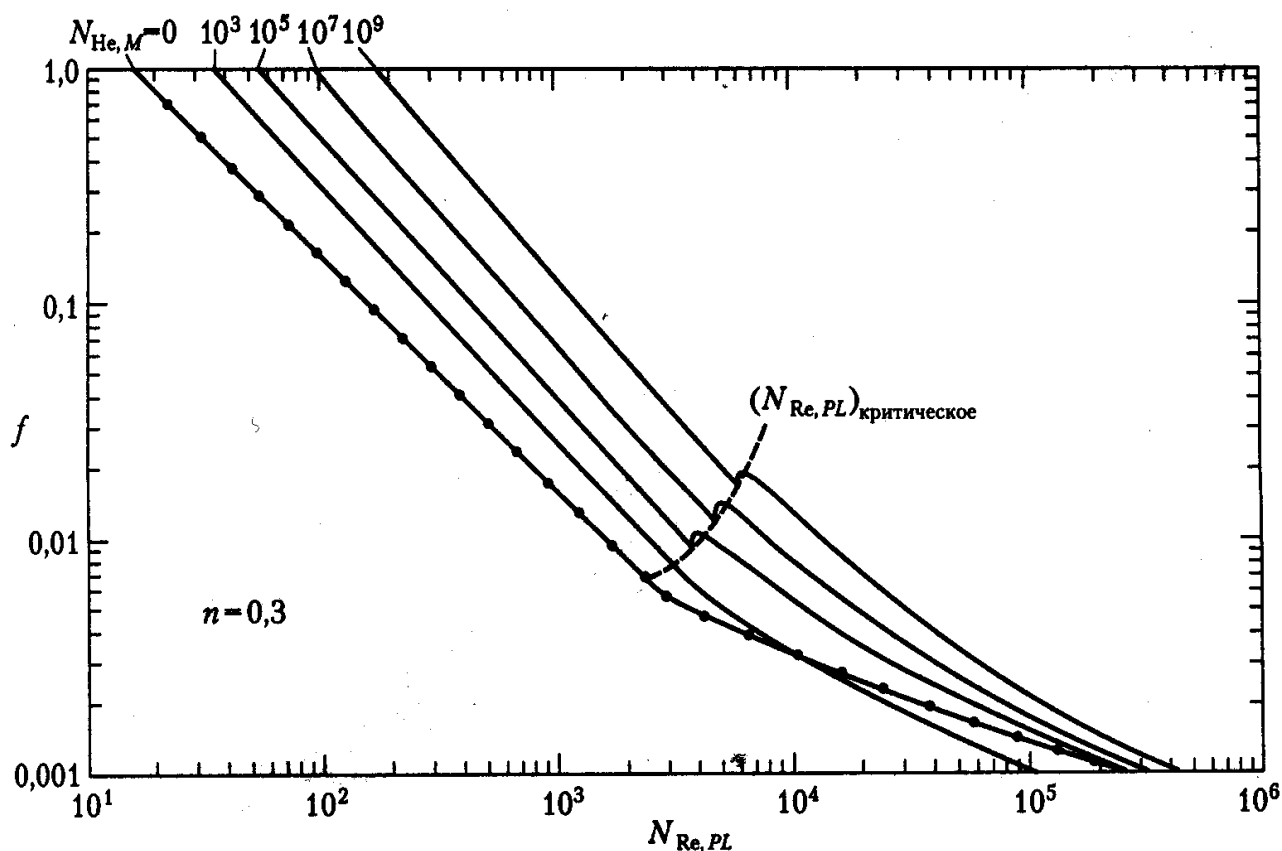


Рис. 1.13. Коэффициент трения  $f$  для жидкостей Гершеля–Балкли при  $n = 0,3$ , основанный на зависимости Хэнкса (Hanks) [16] (по [10])



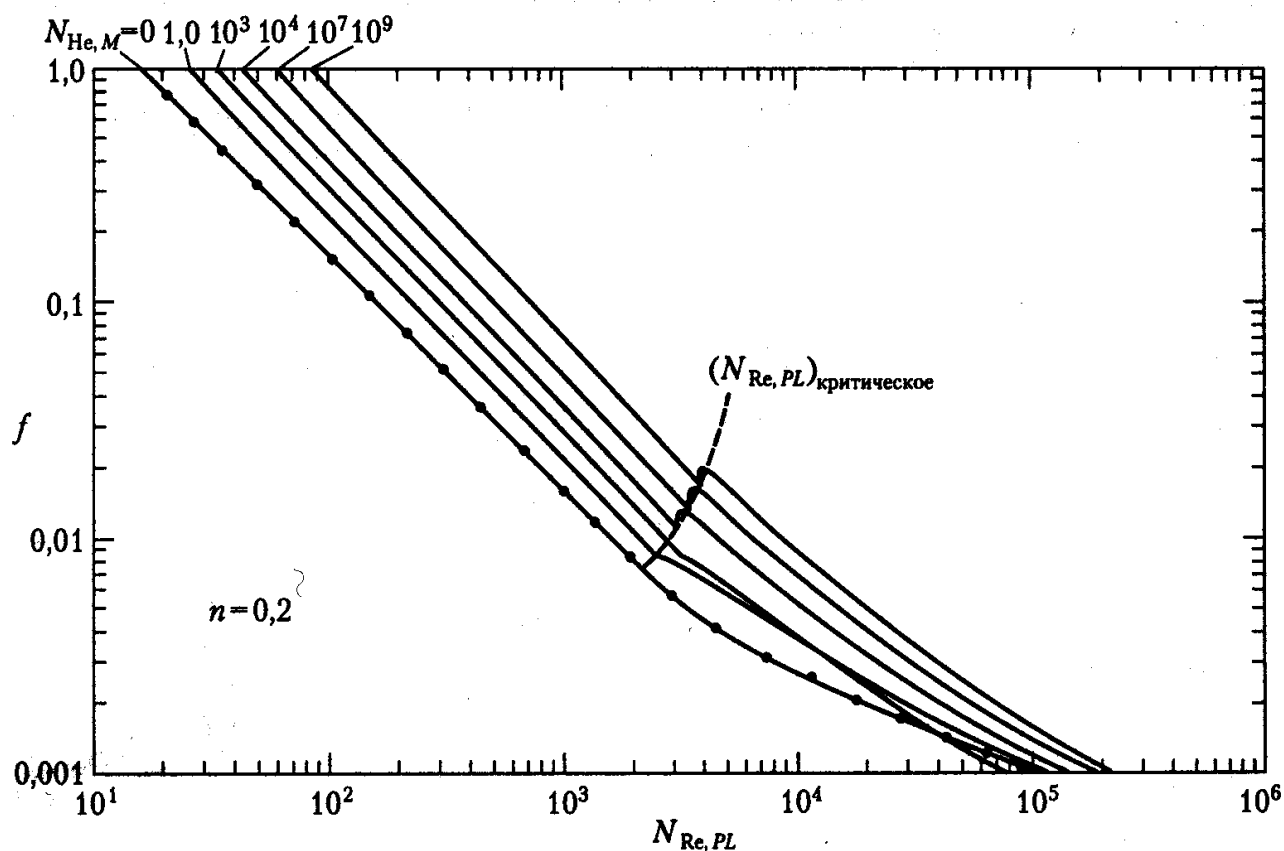


Рис. 1.14. Коэффициент трения  $f$  для жидкостей Гершеля–Балкли при  $n = 0,2$ , основанный на зависимости Хэнкса (Hanks) [16] (по [10])

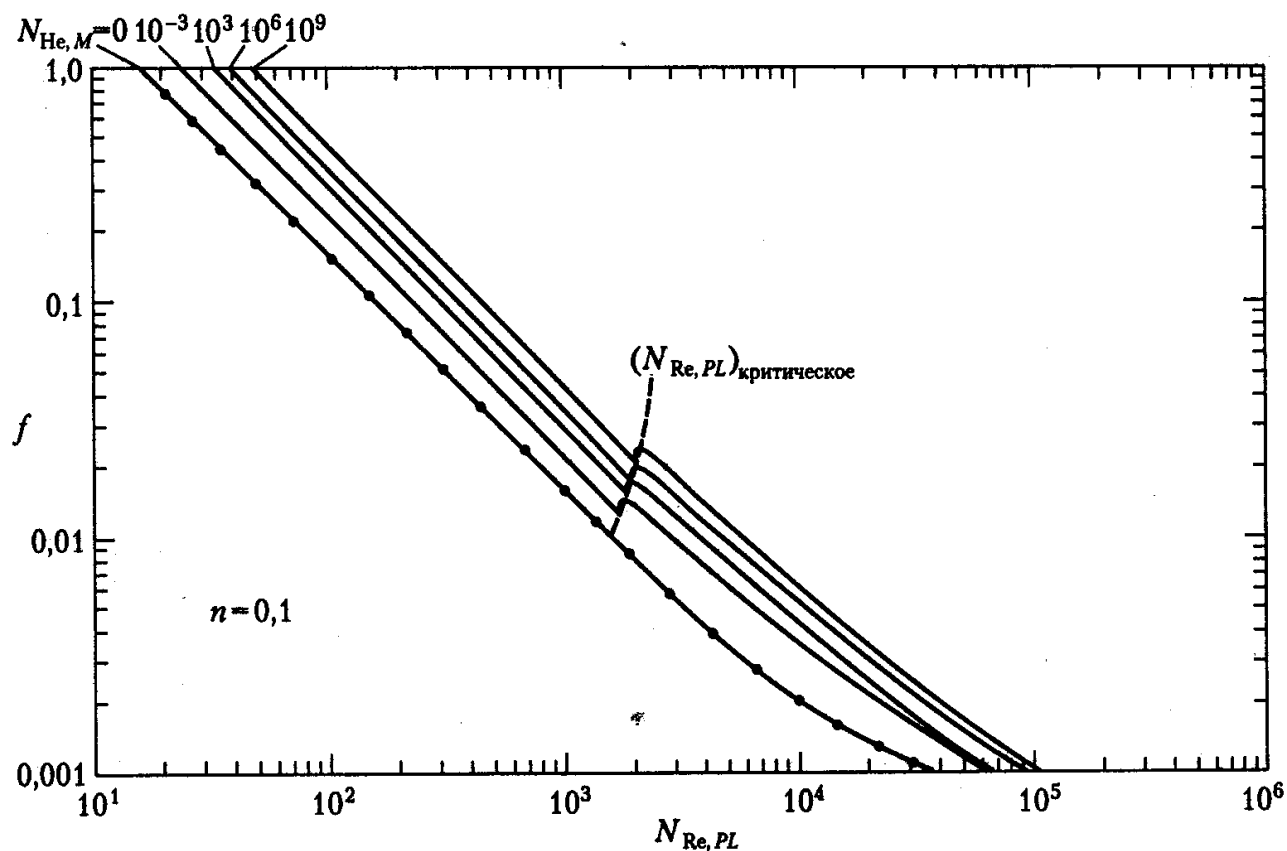


Рис. 1.15. Коэффициент трения  $f$  для жидкостей Гершеля–Балкли при  $n = 0,1$ , основанный на зависимости Хэнкса (Hanks) [16] (по [10])

## 1.2.2 Оценка кинетической энергии

Кинетическая энергия (КЭ) в поперечном сечении трубопровода при действительном законе распределения скоростей по сечению  $u = u(r)$  запишется в виде

$$\text{КЭ}_{\text{сечения}} = r\pi\rho \int_0^R \frac{u^3}{2} r dr. \quad (1.34)$$

Если вычислить КЭ, считая скорость по поперечному сечению постоянной, равной средней скорости  $\bar{u}$ , то получим:

$$\text{КЭ}_{\text{сечения}} = (\rho\pi R^2 \bar{u}) \frac{\bar{u}^2}{2} \cdot \alpha, \quad (1.35)$$

где  $\alpha$  — коэффициент кинетической энергии, показывающий разность в величинах КЭ, вычисленной по действительному распределению скоростей, и через среднюю скорость<sup>1</sup>.

Для ламинарного потока жидкости, подчиняющейся степенному закону,  $\alpha$  является функцией от  $n$ :

$$\text{КЭ} = (\bar{u})^2 \alpha, \quad (1.36)$$

где

$$\alpha = \frac{2(2n+1)(5n+3)}{3(3n+1)^2}. \quad (1.37)$$

Приближенное решение (с погрешностью 2,5%) для вязкопластичных жидкостей Бингама дает [21]

$$\text{КЭ} = \frac{(\bar{u})^2 (2-c)}{2}, \quad (1.38)$$

где  $c = \sigma_0/\sigma_w$ , а  $\alpha = 2/(2-c)$ .

На рис. (1.16) приведены значения коэффициента кинетической энергии для вязкопластичных жидкостей (Бингам, Гершли-Балкли). Там же приведены значения  $\alpha$  для жидкостей, подчиняющихся степенному закону, и ньютоновских жидкостей.

Различия в величинах КЭ для разных жидкостей могут быть вычислены, но, как правило, в расчетах трубопроводов ими можно пренебречь.

<sup>1</sup> В уравнение Бернулли для потока вязкой жидкости должно подставляться значение  $\alpha \frac{\bar{u}^2}{2}$ . Для ламинарного течения вязкой ньютоновой жидкости  $\alpha = 2$ , а для турбулентного —  $\alpha = 1,05 + 1,1$  в зависимости от величины числа Рейнольдса. На практике в этом случае принимают  $\alpha = 1$ .

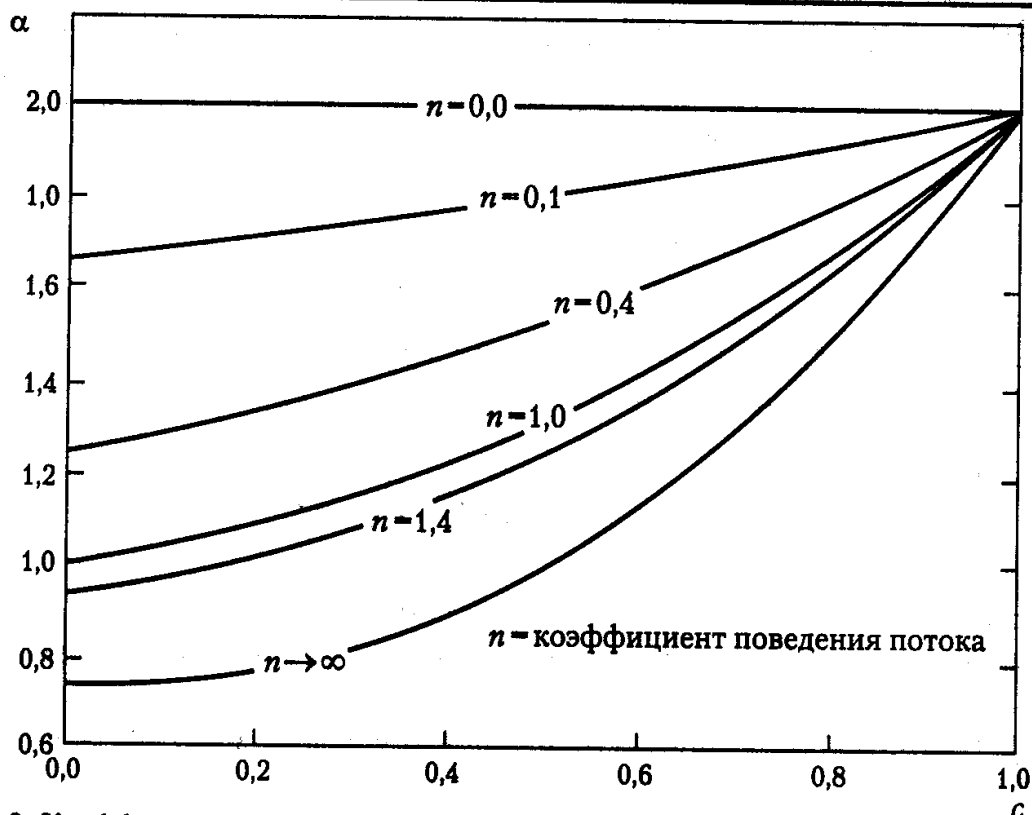


Рис. 1.16. Коэффициенты коррекции КЭ ( $\alpha$ ) для ламинарного потока вязкопластичных жидкостей. По [23]

Таблица 1.5. Коэффициенты местных потерь для турбулентного потока ньютоновских жидкостей через клапаны и фитинги<sup>1</sup>

Тип фитинга или клапана	$k_f$
С изгибом 45°, стандартный	0,35
С изгибом 45°, с большим радиусом	0,2
С изгибом 90°, стандартный	0,75
с большим радиусом	0,45
прямоугольный или со скосом под углом 45°	1,3
С переходом 180°, с изгибом вблизи от возврата	1,5
Тройник, стандартный, при продольном течении с закрытым ответвлением	0,4
используемый как колено, на входе основного потока	1,0
используемый как колено, на входе в ответвление	1,0
разветвляющийся поток	1,0 <sup>a</sup>

<sup>1</sup> В табл. 1.5, 1.6 коэффициенты местных потерь соответствуют их значениям при развитом турбулентном режиме течения, когда они не зависят от числа Рейнольдса. Для ламинарного потока следует использовать эмпирическую формулу (1.42) с коэффициентом  $\beta$ , различным для разных диапазонов числа Рейнольдса.

Таблица 1.5 (Окончание)

Тип фитинга или клапана	$k_f$
Муфта	0,04
Штуцер	0,04
Затвор, клапанный, в открытом состоянии	0,17
$\frac{3}{4}$ , открытый <sup>б</sup>	0,9
$\frac{1}{2}$ , открытый <sup>б</sup>	4,5
$\frac{1}{4}$ , открытый <sup>б</sup>	24,0
Мембранный клапан, открытый	2,3
$\frac{3}{4}$ , открытый <sup>б</sup>	2,6
$\frac{1}{2}$ , открытый <sup>б</sup>	4,3
$\frac{1}{4}$ , открытый <sup>б</sup>	21,0
Шаровой клапан, с коническим седлом, открытый	6,0
$\frac{1}{2}$ , открытый <sup>б</sup>	9,5
с составным седлом, открытый	6,0
$\frac{1}{2}$ , открытый <sup>б</sup>	8,5
с дисковой задвижкой, открытый	9,0
$\frac{3}{4}$ , открытый <sup>б</sup>	13,0
$\frac{1}{2}$ , открытый <sup>б</sup>	36,0
$\frac{1}{4}$ , открытый <sup>б</sup>	112,0
Угловой клапан, открытый <sup>б</sup>	2,0
Пробковый кран	
$\theta = 0^\circ$ (открыт полностью)	0,0
$\theta = 5^\circ$	0,05
$\theta = 10^\circ$	0,29
$\theta = 20^\circ$	1,56
$\theta = 40^\circ$	17,3
$\theta = 60^\circ$	206,0
Дроссельный клапан	
$\theta = 0^\circ$ (открыт полностью)	0,0
$\theta = 5^\circ$	0,24
$\theta = 10^\circ$	0,52
$\theta = 20^\circ$	1,54
$\theta = 40^\circ$	10,8
$\theta = 60^\circ$	118,0
Запорный клапан, пружинного типа	2,0 <sup>в</sup>
дисковый	10,0 <sup>в</sup>
шариковый	70,0 <sup>в</sup>

<sup>а</sup> Перепад давления (включая изменение коэффициента трения) между основной магистралью и ответвлением рассчитан по скорости основного потока перед ответвлением. Действительное значение зависит от степени разделения потока и может меняться от 0,5 до 1,3 при входе потока в основную магистраль и от 0,7 до 1,5 — при входе потока в ответвление.

<sup>б</sup> Открытая щель прямо пропорциональна расходу или ходу маховичка. Направление потока через некоторые типы клапанов незначительно влияет на перепад давления. Для практических расчетов этими эффектами можно пренебречь.

<sup>в</sup> Данные значения применимы только в тех случаях, когда запорный клапан открыт полностью, что обычно бывает при скоростях потока свыше 1 м/с (для воды).

По [26].

### 1.2.3 Потери механической энергии на местных сопротивлениях

Для определения коэффициентов потерь на местных сопротивлениях  $k_f$  необходимы экспериментальные данные. Большинство из опубликованных данных относятся к турбулентному потоку воды [5]. Эти значения затем были обобщены в самых разных учебных и справочных пособиях, например в [26]. Данные по ламинарному потоку приводятся лишь для некоторых геометрических форм местных сопротивлений и по специфическим жидкостям: ньютоновским [18], с уменьшением напряжения сдвига [9, 19, 30] и с его увеличением [13]. В общем, можно утверждать, что данных, необходимых для расчета перепадов давления при ламинарном потоке жидкостей (особенно неньютоновских) через клапаны и фитинги, недостаточно.

Коэффициенты потерь в различных клапанах и фитингах сведены в табл. 1.5 и 1.6. Значение  $k_f$  для потока, проходящего через резкое сужение, можно рассчитать по формуле

$$k_f = 0,55 \left( 1 - \frac{A_2}{A_1} \right) \frac{2}{\alpha}, \quad (1.39)$$

где  $A_1$  — площадь поперечного сечения «выше по течению», а  $A_2$  — «ниже по течению».

Изменения при резком расширении или на выпуске находят по уравнению Борда–Карно:

$$k_f = \left( 1 - \frac{A_1}{A_2} \right)^2 \frac{2}{\alpha}. \quad (1.40)$$

Уравнения (1.39) и (1.40) верны для турбулентного потока ньютоновских жидкостей и выведены из закона количеств движения. Предполагается, что изменения про-

Таблица 1.6. Коэффициенты местных потерь (значения  $k_f$ ) для ламинарного потока ньютоновских жидкостей через клапаны и фитинги

Тип клапана или фитинга	$N_{Re}$		
	1000	500	100
С изгибом 90°, стандартный	0,9	1,0	7,5
Тройник, стандартный, при продольном течении	0,4	0,5	2,5
Из ответвления в основную магистраль	1,5	1,8	4,9
Затвор, клапанный	1,2	1,7	9,9
Шаровой клапан, составной диск	11	12	20
Задвижка	12	14	19
Угловой клапан	8	8,5	11
Запорный клапан, пружинного типа	4	4,5	17

По [18].

исходят из-за завихрений в потоке. В некоторых случаях (как, например, у жидкостей Гершеля–Балкли, где  $\alpha$  — функция от  $c$ ) у каждого участка сужения или расширения будет свое значение  $\alpha$ ; тем не менее различия незначительны, и отдельно считать их неудобно. Применять рекомендуется наименьшее значение  $\alpha$  (включающее большее значение величины  $k_f$ ), полученное для участков «выше» и «ниже» по течению.

После изучения доступных данных по изменению коэффициента трения в ламинарном и турбулентном потоке жидкости были предложены [29] следующие рекомендации по расчету значений  $k_f$  (с некоторым запасом для жидкостей с уменьшением напряжения сдвига):

1. Для турбулентного или ламинарного потока ньютоновских жидкостей следует использовать данные из [26] и [18] соответственно (см. табл. 1.5 и 1.6).
2. Для неньютоновских жидкостей с числом Рейнольдса выше 500 ( $N_{Re}$ ,  $N_{Re,PL}$ ,  $N_{Re,B}$ ) следует использовать данные для ньютоновских жидкостей в турбулентном потоке.
3. Для неньютоновских жидкостей с числом Рейнольдса от 20 до 500 следует использовать следующее уравнение:

$$k_f = \frac{\beta}{N}, \quad (1.41)$$

где  $N$  —  $N_{Re}$ ,  $N_{Re,PL}$  или  $N_{Re,B}$  в зависимости от типа рассматриваемой жидкости, а  $\beta$  находится для конкретного клапана или фитинга (или другого элемента, например, сужения) путем умножения коэффициента в турбулентном потоке на 500:

$$\beta = (k_f)_{\text{турбул}} 500. \quad (1.42)$$

Таблица 1.7. Значения  $\beta$  для уравнения 1.41<sup>1</sup>

Тип клапана или фитинга	$\beta$	$N_{Re}$
90°, с небольшой кривизной закругления, одно- или двухдюймовый	842	1–1000
Полностью открытый затворный клапан, одно- или двухдюймовый	273	0,1–100
Полностью открытый шаровой клапан с прямоугольной задвижкой, дюймовый	1400	0,1–10
Полностью открытый шаровой клапан с круглой задвижкой, дюймовый	384	0,1–10
Сужение, $A_2/A_1 = 0,445$	110	1–100
Сужение, $A_2/A_1 = 0,660$	59	1–100
Расширение, $A_2/A_1 = 1,52$	88	1–100
Расширение, $A_2/A_1 = 1,97$	139	1–100

<sup>1</sup> Значения получены по данным Эдвардса и др. [9].

Значения  $\beta$  для многих стандартных элементов оборудования можно рассчитать, исходя из значений  $k_f$ , приведенных в табл. 1.5. Некоторые значения  $\beta$  могут быть определены (табл. 1.7) из работы [9], в которой собраны экспериментальные данные для различной арматуры. В указанной работе рассмотрены пять видов жидкостей: вода, смазочное масло, смесь воды с глицерином, смесь воды с синтетическим моющим средством и смесь воды с каолином ( $0,18 < n < 0,27$ ;  $3,25 < K < 29,8$ ). Уравнения (1.41) и (1.42) применимы также для ньютоновских жидкостей при  $20 < N_{Re} < 500$ .

Данные рекомендации следует использовать осторожно и лишь при отсутствии необходимых экспериментальных данных. Некоторые факторы (например, сверхвысокая вязкость) могут существенно повлиять на значение  $k_f$ .

## 1.3 Примеры расчетов

Рассмотрим типичную схему потока жидкости (рис. 1.17). В ней присутствует трубопровод диаметром  $0,0348$  м, длиной  $L = 10,5$  м, с объемным расходом  $Q = 1,57 \times 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с или со средней скоростью  $\bar{u} = 1,66$  м/с. Плотность жидкости  $\rho = 1250$  кг/м<sup>3</sup>, а перепад давления на сетчатом фильтре составляет  $100$  кПа. На входе, запорном клапане и на трех коленах с большим радиусом закругления существуют местные потери напора<sup>1</sup>.

Уравнения сохранения механической энергии (уравнение (1.1)) для рабочего выхода имеет вид:

$$W = \frac{\alpha_1 (\bar{u}_2)^2}{\alpha_2} - \frac{\alpha_2 (\bar{u}_1)^2}{\alpha_1} + g(z_2 - z_1) + \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \sum F \quad (1.43)$$

Индексы 1 и 2 относятся соответственно к уровню жидкости в резервуаре (танке) и на выходе из системы трубопровода. Предположив, что площадь сечения  $A_1$  в танке велика, так что скоростью в этом сечении можно пренебречь ( $\bar{u}_1 = 0$ ) ( $\bar{u}_1 = 0$ ), а давление  $P_1$  и  $P_2$  одинаковы и равны атмосферному. Упростим уравнение (1.43) до

$$W = g(z_2 - z_1) + \frac{(\bar{u}_2)^2}{\alpha_2} + \sum F, \quad (1.44)$$

где  $W$  представляет собой входную работу насоса на единицу массы, а уравнение (1.2) включает перепад давлений через сетчатый фильтр в виде  $\delta P/\rho$ , добавленный к сумме потерь на трение по длине и потерь на местные сопротивления.

$$\sum F = \frac{2f\bar{u}^2 L}{D} + \frac{(k_{f, \text{вход}})\bar{u}^2}{2} + \frac{(k_{f, \text{клапан}})\bar{u}^2}{2} + \frac{3(k_{f, \text{колено}})\bar{u}^2}{2} + \frac{100\,000}{1250} \quad (1.45)$$

<sup>1</sup> В нижеприведенных численных примерах не всегда соблюдены правила приближенных вычислений: например, пишется  $212,2$  Па, а следует писать  $212$  Па, или  $y^+ = 241,71$ , а следует писать  $242$ . Эти замечания следует учитывать при расчетах.

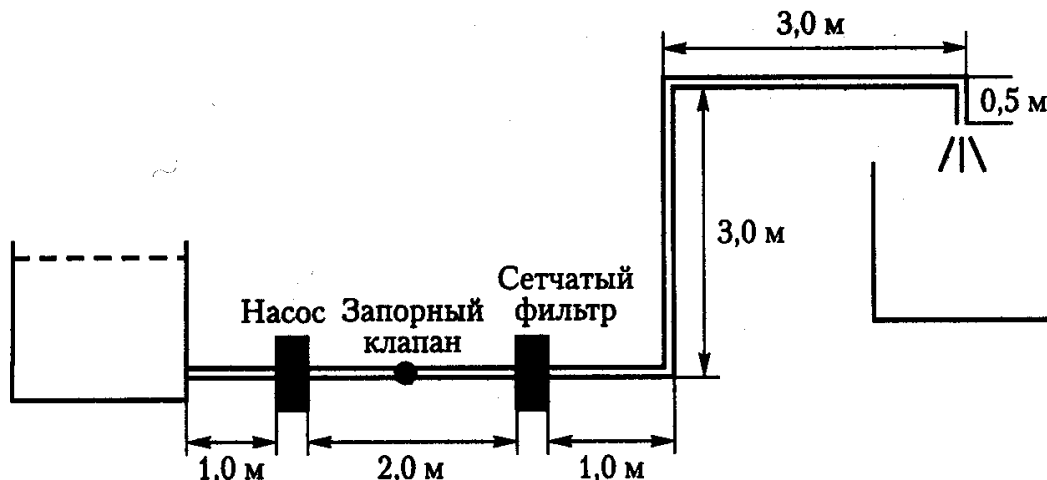


Рис. 1.17. Типичная система трубопровода (по [31])

или

$$\sum F = \frac{2f\bar{u}^2 L}{D} + (k_{f,\text{вход}} + k_{f,\text{клапан}} + 3(k_{f,\text{колено}})) \frac{\bar{u}^2}{2} + 80,0. \quad (1.46)$$

Перепад давления на насосе составляет

$$(\delta P)_p = W\rho. \quad (1.47)$$

В нижеследующих примерах будут меняться лишь реологические свойства жидкостей, а все остальные параметры останутся прежними.

### 1.3.1 Пример 1: ньютоновская жидкость в ламинарном потоке

Предположив  $\mu = 0,34 \text{ Па} \cdot \text{с}$ , получим  $N_{\text{Re}} = 212,4$ , что попадает в диапазон  $N_{\text{Re}} < 2100$ . Тогда из табл. 1.5 и уравнений (1.39), (1.41) и (1.42) получим:

$$k_{f,\text{вход}} = \frac{0,55 \cdot (2,0/1,0) \cdot 500}{212,4} = 2,59,$$

$$k_{f,\text{клапан}} = \frac{9 \cdot 500}{212,4} = 21,18,$$

$$k_{f,\text{колено}} = \frac{0,45 \cdot 500}{212,4} = 1,06.$$

Коэффициент трения рассчитывается по уравнению (1.8):

$$f = \frac{16}{212,4} = 0,0753.$$



В этом случае суммарная потеря напора составляет

$$\sum F = \frac{2 \cdot 0,0753 \cdot 1,66^2 \cdot 10,5}{0,0348} + (2,59 + 21,18 + 3 \cdot 1,06) \frac{1,66^2}{2} + 80,0 = 242,4 \text{ Дж/кг},$$

а

$$W = 9,81 \cdot 2,5 + \frac{1,66^2}{2} + 242,4 = 268,4 \text{ Дж/кг},$$

$$(\delta P)_p = 268,4 \cdot 1250 = 335,5 \text{ кПа}.$$

### 1.3.2 Пример 2: ньютоновская жидкость в турбулентном потоке

Предположим, что  $\mu = 0,012 \text{ Па} \cdot \text{с}$ , а  $N_{\text{Re}} = 6018$  (значение  $N_{\text{Re}}$  в турбулентном потоке). Коэффициенты местных потерь выводятся из уравнения (1.39) и табл. 1.2:  $k_{f, \text{вход}} = 0,55$ ,  $k_{f, \text{клапан}} = 9$ ,  $k_{f, \text{колено}} = 0,45$ . Коэффициент трения определяется итерацией из уравнения (1.9):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4,0 \lg(6018 \sqrt{f}) - 0,4,$$

что дает  $f = 0,0089$ . Продолжая, получим:

$$\sum F = \frac{2 \cdot 0,0089 \cdot 1,66^2 \cdot 10,5}{0,0348} + (0,55 + 9 + 3 \cdot 0,45) \frac{1,66^2}{2} + 80,0 = 109,8 \text{ Дж/кг}$$

и

$$W = 9,81 \cdot 2,5 + \frac{1,66^2}{2} + 109,8 = 135,7 \text{ Дж/кг},$$

$$(\delta P)_p = 135,7 \cdot 1250 = 170 \text{ кПа}.$$

### 1.3.3 Пример 3: жидкость, подчиняющаяся степенному закону, в ламинарном потоке

Предположим,  $K = 5,2 \text{ Па} \cdot \text{с}^{-n}$ ;  $n = 0,45$ ,  $N_{\text{Re}, PL} = 323,9$  (значение  $N_{\text{Re}, PL}$  в ламинарном потоке). Тогда из табл. 1.5 и уравнений 1.37, 1.41 и 1.42 получим:

$$k_{f, \text{вход}} = \frac{0,55 \cdot (2/1,2) \cdot 500}{323,9} = 1,42,$$

$$k_{f, \text{клапан}} = \frac{9 \cdot 500}{323,9} = 13,89,$$

$$k_{f, \text{колено}} = \frac{(0,45) 500}{323,9} = 0,69.$$

Коэффициент трения рассчитывается по уравнению (1.12):

$$f = \frac{16}{323,9} = 0,0494.$$

Тогда

$$\sum F = \frac{2 \cdot 0,0494 \cdot 1,66^2 \cdot 10,5}{0,0348} = (1,42 + 13,89 + 3 \cdot 0,69) \frac{1,66^2}{2} + 80,0 = 189,1 \text{ Дж/кг.}$$

Используя уравнение (1.37) для расчета  $\alpha$ , получим:

$$W = 9,81 \cdot 2,5 + \frac{1,66^2}{2} + 189,1 = 215,9 \text{ Дж/кг,}$$

$$(\delta P)_p = 215,9 \cdot 1250 = 270 \text{ кПа.}$$

### 1.3.4 Пример 4: жидкость в турбулентном потоке, подчиняющаяся степенному закону

Предположим,  $K = 0,25 \text{ Па} \cdot \text{с}^{-n}$ , а  $n = 0,45$ ;  $N_{Re,PL} = 6736,6$ . Критическое значение  $N_{Re,PL}$  можно рассчитать как:

$$(N_{Re,PL})_{\text{критическое}} = \frac{6464 \cdot 0,45}{(1 + 3 \cdot 0,45)^2 \left( \frac{1}{2 + 0,45} \right)^{(2+0,45)/(1+0,45)}} = 2394,$$

имея в виду, что поток является турбулентным, так как  $6736,6 > 2394$ . Коэффициенты потерь из-за трения — те же, что и в примере 2:  $k_{f, \text{вход}} = 0,55$ ;  $k_{f, \text{клапан}} = 9$ ;  $k_{f, \text{колесо}} = 0,45$ . Коэффициент трения определяется итерацией из уравнения (1.15):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{4}{0,45^{0,75}} \log_{10} \left[ 6736,6 \cdot f^{1-0,45/2} \right] - \frac{0,4}{0,45^{1,2}},$$

где  $f = 0,0051$ . Тогда:

$$\sum F = \frac{2 \cdot 0,0051 \cdot 1,66^2 \cdot 10,5}{0,0348} + (0,55 + 9 + 3 \cdot 0,45) \frac{1,66^2}{2} + 80,0 = 103,5 \text{ Дж/кг}$$

и

$$W = 9,81 \cdot 2,5 + \frac{1,66^2}{2} + 103,5 = 129,4 \text{ Дж/кг;}$$

$$(\delta P)_p = 129,4 \cdot 1250 = 162 \text{ кПа.}$$

### 1.3.5 Пример 5: вязкопластичная жидкость по Бингаму в ламинарном потоке

Предположим,  $\mu_{PL} = 0,34 \text{ Па} \cdot \text{с}$ , а  $\sigma_0 = 50 \text{ Па}$ , что дает  $N_{Re,B} = 212,4$  и  $N_{He} = 654,8$ . Для проверки режима потока  $c_c$  рассчитывается из уравнения 1.24:

$$\frac{c_c}{(1 - c_c)^3} = \frac{654,8}{16\,800},$$

что дает  $c_c = 0,035$ . Критическое значение  $N_{Re,B}$  выводится из уравнения 1.23:

$$(N_{Re,B})_{\text{критическое}} = \frac{654,8}{8 \cdot 0,035} \left( 1 - \frac{4}{3} \cdot 0,035 + \frac{1}{3} \cdot 0,035^4 \right) - 2229,$$

имея в виду, что поток является ламинарным, так как  $212,4 < 2229$ .

Коэффициенты потерь из-за трения можно определить из табл. 1.5 и уравнений (1.39), (1.41) и (1.42); тем не менее в данном конкретном случае  $N_{Re,B} = N_{Re,PL} = 212,4$ , так что коэффициенты потерь из-за трения в данном примере будут теми же, что и в примере 1:  $k_{f,\text{вход}} = 2,59$ ;  $k_{f,\text{клапан}} = 21,18$ ;  $k_{f,\text{колесо}} = 1,06$ .  $\alpha$ , являющаяся функцией  $c$  (см. рис. 1.17), принимается за 1 (наихудший вариант). Коэффициент трения находится итерацией из уравнения 1.20:

$$\frac{1}{212,4} = \frac{f}{16} - \frac{654,8}{6 \cdot 212,4^2} + \frac{654,8^4}{3f^3 212,4^8},$$

что дает  $f = 0,114$ .

Тогда

$$\sum F = \frac{2 \cdot 0,114 \cdot 1,66^2 \cdot 10,5}{0,348} + (2,59 + 21,18 + 3 \cdot 1,06) \frac{1,66^2}{2} + 80,0 = 306,7$$

и

$$W = 9,81(2,5) + (1,66)2 + 306,7 = 334,0 \text{ Дж/кг};$$

$$(\delta P)_p = (334,0)(1250) = 418 \text{ кПа}.$$

### 1.3.6 Пример 6: жидкость Герцеля–Балкли в ламинарном потоке

Предположим,  $K = 5,2 \text{ Па} \cdot \text{с}^{-n}$ , а  $\sigma_0 = 50 \text{ Па}$  и  $n = 0,45$ , что дает  $N_{Re,PL} = 323,9$  и  $N_{He,M} = 707,7$ . Поток является ламинарным (рис. 1.1), и коэффициенты потерь из-за трения те же, что и в примере 3, так как числа Рейнольдса в каждом случае одинако-

вы:  $k_{f, \text{вход}} = 0,83$ ;  $k_{f, \text{клапан}} = 13,89$ ;  $k_{f, \text{колено}} = 0,69$ . Кроме того,  $\alpha$  (см. рис. 1.16), принимается в данном случае для наихудшего варианта. Коэффициент трения рассчитывается усреднением значений, найденных по рис. 1.11 и 1.12:

$$f = \frac{0,071 + 0,081}{2} = 0,076.$$

Тогда

$$\sum F = \frac{2 \cdot 0,076 \cdot 1,66^2 \cdot 10,5}{0,348} + (1,42 + 13,89 + 3 \cdot 0,69) \frac{1,66^2}{2} + 80,0 = 230,3 \text{ Дж/кг}$$

и

$$W = 9,81 \cdot 2,5 + 1,66^2 + 230,3 = 257,1 \text{ Дж/кг};$$

$$(\delta P)_p = 257,1 \cdot 1250 = 321 \text{ кПа}.$$

## 1.4 Профили скорости потока в трубе

### 1.4.1 Ламинарный поток

Профили скорости потока в трубах важно знать по различным причинам (например, для расчета соответствующей длины труб с продуктом в системах термообработки). Уравнения для расчета профилей скорости при ламинарном потоке легко вывести из фундаментальных уравнений движения. Для ньютоновских жидкостей результатом будет

$$u = f(r) = \frac{\delta P}{4L\mu} (R^2 - r^2), \quad (1.48)$$

а для жидкостей, подчиняющихся степенному закону, —

$$u = f(r) = \left( \frac{\delta P}{2LK} \right)^{1/n} \frac{n}{n+1} \left[ R^{\frac{n+1}{n}} - r^{\frac{n+1}{n}} \right]. \quad (1.49)$$

Связь между средней и максимальной скоростью ( $u_{\max}$ ) на оси трубы выражается через уравнение

$$\frac{\bar{u}}{u_{\max}} = \frac{1+n}{1+3n}. \quad (1.50)$$

В случае вязкопластичных жидкостей Бингама уравнение для профиля скорости будет выглядеть как

$$u = f(r) = \left( \frac{(\delta P) R^2}{4KL} \right) \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 - \frac{2r_0}{R} \left( 1 - \frac{r}{R} \right) \right]. \quad (1.51)$$

Скорость потока при  $\sigma \leq \sigma_0$  для  $r \leq r_0$  равна

$$u = f(r) = \frac{(\delta P) R^2}{4KL} \left( 1 - \frac{r_0}{R} \right)^2, \quad (1.52)$$

где значение критического радиуса  $r_0$  рассчитывается по формуле

$$r_0 = \frac{\sigma_0 2L}{(\delta P)}. \quad (1.53)$$

Можно также определить скоростной профиль для жидкости Гершеля–Балкли по формуле

$$u = f(r) = \frac{2L}{(\delta P) \left( \frac{1}{n} + 1 \right) K^{\frac{1}{n}}} \left[ (\sigma_w - \sigma_0)^{\frac{1}{n} + 1} - \left( \frac{(\delta P)r}{2L} - \sigma_0 \right)^{\frac{1}{n} + 1} \right]. \quad (1.54)$$

## 1.4.2 Турбулентный поток

Расчеты для ньютоновских жидкостей в турбулентном потоке весьма надежны; для жидкостей, подчиняющихся степенному закону, аналогичные расчеты известны, но они пока что экспериментально подтверждены недостаточно.

### 1.4.2.1 Ньютоновские жидкости

«Полуэмпирические» уравнения для расчета профиля скоростей ньютоновских жидкостей в турбулентном потоке в гладких трубах получены и приведены в многочисленных учебниках и справочниках (например, в [2, 7, 14]). Эти уравнения представлены для различных участков поперечного сечения трубы:

– для вязкого промежуточного слоя (вязкого «подслоя»):

$$u^+ = y^+, \quad y^+ \leq 5; \quad (1.55)$$

– для переходной зоны, где зарождаются турбулентные пульсации:

$$u^+ = -3,05 + 11,513 \log_{10} y^+, \quad 5 < y^+ < 30; \quad (1.56)$$

– для ядра турбулентности:

$$u^+ = 5,5 + 5,756 \log_{10} y^+, \quad 30 \leq y^+, \quad (1.57)$$

где

$$u^+ = \frac{u}{u^*}, \quad (1.58)$$

$$y^+ = \frac{yu^*\rho}{\mu}, \quad (1.59)$$

$$u^* = \sqrt{\frac{\sigma_w}{\rho}} = \bar{u} \sqrt{\frac{f}{2}}; \quad (1.60)$$

здесь  $u^*$  — так называемая динамическая скорость (скорость «трения»), а  $y$  — расстояние от стенки трубы, равно

$$y = R - r. \quad (1.61)$$

Начало системы координат располагается на стенке трубы; скорость равна нулю там, где  $y = 0$ , и достигает максимума в центре трубы, где  $r = 0$  и  $y = R$ . В своей совокупности вышеприведенные уравнения составляют общий профиль скоростей.

Инженеры, работающие в пищевой промышленности, часто сталкиваются с проблемой расчета максимальной скорости потока в трубопроводе. Чтобы показать общий подход к решению этой проблемы, рассмотрим следующий пример.

### Пример 1.1

Предположим,  $\mu = 0,010$  Па · с;  $D = 0,0348$  м;  $\bar{u} = 1,75$  м/с;  $\rho = 1225$  кг/м<sup>3</sup>;  $N_{Re} = 7460$ ;  $f = 0,0084$ . Скорость максимальна по центральной линии трубы, где  $y = R$ , а динамическая скорость равна

$$u^* = \bar{u} \sqrt{\frac{f}{2}} = 1,75 \sqrt{\frac{0,0084}{2}} = 0,1134 \text{ м/с.}$$

Далее рассчитываем

$$y^+ = \frac{yu^*\rho}{\mu} = \frac{(0,0348/2) \cdot 0,1134 \cdot 1225}{0,010} = 241,71 \text{ (при } y = R),$$

$$u^+ = 5,5 + 5,756 \lg(y^+) = 5,5 + 5,756 \lg(241,71) = 19,22.$$

Максимальная скорость может быть рассчитана по определению турбулентной скорости,  $u^+ = u/u^*$ , как

$$u_{\max} = u + u^* = 19,22 \cdot 1134 = 2,18 \text{ м/с.}$$

Определив максимальную скорость, для приближенного вычисления  $u/u_{\max}$  на других участках можно использовать степенное уравнение:

$$\frac{u}{u_{\max}} = \left(\frac{y}{R}\right)^m = \left(\frac{R-r}{R}\right)^m. \quad (1.62)$$

При этой записи пренебрегают толщиной вязкого подслоя и переходной зоны ( $y^+ \geq 30$ ). Показатель степени  $m$  зависит от величины числа Рейнольдса. При малых (турбулентных) числах  $Re$   $m = 1/6$ ; с ростом числа Рейнольдса значение  $m$  уменьшается до  $1/10$ .

Например, скорость при показателе степени  $m = 1/7$  ( $Re = 10^4 - 10^5$ ) посередине между центральной линией и стенкой трубы ( $r = 0,5R$ ) можно рассчитать как

$$\frac{u}{u_{\max}} = \left( \frac{R - r}{R} \right)^{1/7} = 0,5^{1/7} = 0,9067,$$

что дает

$$u = 0,9067 \cdot 2,18 = 1,98 \text{ м/с.}$$

#### 1.4.2.2 Жидкости, подчиняющиеся степенному закону

В работе [8] было выведено уравнение для описания профиля скоростей в трубе жидкостей, подчиняющихся степенному закону. Небольшие погрешности были скорректированы в [27], и в результате уравнения выглядят следующим образом:

– для ламинарного потока:

$$u^+ = (y^+)^{1/n}, \quad (1.63)$$

– для турбулентного ядра:

$$u^+ = \frac{5,66}{n^{0,75}} \lg y^+ - \frac{5,66}{n^{1,2}} + \frac{3,475}{n^{0,75}} \left[ 1,960 + 0,815n - 1,628n \lg \left( 3 + \frac{1}{n} \right) \right], \quad (1.64)$$

$$y^+ = \frac{y^n (u^*)^{2-n} \rho}{K}. \quad (1.65)$$

Константы берут из измерений коэффициента трения таким образом, что толщина ламинарной прослойки не учитывается. Вышеприведенное уравнение можно использовать для определения максимальной скорости в трубе. Рассмотрим следующую задачу.

#### Пример 1.2

Предположим,  $K = 0,31 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$ ;  $D = 0,0348 \text{ м}$ ;  $\bar{u} = 1,75 \text{ м/с}$ ;  $\rho = 1225 \text{ кг/м}^3$ ;  $N_{Re,PL} = 7741$ ;  $n = 0,40$ ;  $f = 0,0045$ .

Скорость максимальна по центральной линии трубы, где  $y = R$ . Динамическая скорость равна

$$u^* = \bar{u} \sqrt{\frac{f}{2}} = 1,75 \sqrt{\frac{0,0045}{2}} = 0,083 \text{ м/с}$$

и

$$y^+ = \frac{y^n (u^*)^{2-n} \rho}{K} = \frac{(0,0348/2)^{0,4} \cdot 0,0838^{2-0,4} \cdot 1225}{0,31} = 14,6,$$

$$u^+ = \frac{5,66}{0,4^{0,75}} \lg 14,6 - \frac{0,566}{0,4^{1,2}} + \frac{3,475}{0,4^{0,75}} \left[ 1,960 + 0,815 \cdot 0,4 - 1,628 \cdot 0,4 \cdot \lg \left( 3 + \frac{1}{0,4} \right) \right] = 23,86.$$

Максимальная скорость может быть рассчитана по определению турбулентной скорости,  $u^+ = u/u^*$ , как

$$u_{\max} = u^+ u^* = 23,86 \cdot 0,083 = 1,98 \text{ м/с}.$$

Другое уравнение для определения скорости в турбулентном ядре для жидкостей, подчиняющихся степенному закону, было предложено в работе [4], а именно:

$$u^+ = \frac{2,78}{n} 1,303 \lg y^+ + \frac{3,80}{n}. \quad (1.66)$$

Данное уравнение отлично соотносится с экспериментальными данными при  $0,698 < n < 0,813$  и  $5480 < N_{Re,PL} < 42\,800$ .

## 1.5 Выбор оптимального диаметра трубопровода

Выбор оптимального диаметра трубопровода при проектировании технологических линий пищевых производств обычно основан на требованиях, предъявляемых к производственному оборудованию, например, к размеру впускного отверстия насоса. Тем не менее оптимальные решения могут состояться только при использовании данных по экономической эффективности. Выбор зависимостей для ньютоновских жидкостей рассмотрен в работе [7], а в работе [6] приведены зависимости для определения диаметра трубы для ньютоновских жидкостей, вязкопластичных жидкостей Бингама и степенных жидкостей. Такие же решения для перекачки жидкостей Гершеля–Балкли были приведены в работе [11].

## Список обозначений

$L$	длина трубопровода, м
$D$	диаметр трубопровода, м
$R$	радиус трубопровода, м
$r$	радиальная координата, м
$r_0$	критический радиус, м
$z$	высота относительно выбранной плоскости сравнения, м
$u$	скорость движения жидкости в произвольной точке по сечению трубы, м/с
$Q$	объемный расход, м <sup>3</sup> /с
$\bar{u}$	$Q/(\pi R^2)$ , средняя скорость, м/с
$u_{\max}$	максимальная скорость на оси трубы, м/с



$g$	ускорение свободного падения, $9,81 \text{ м/с}^2$
$A$	$\pi R^2$ , площадь поперечного сечения трубы, $\text{м}^2$
$\dot{\gamma}$	относительная скорость сдвига, $\text{с}^{-1}$
$\mu$	коэффициент динамической вязкости ньютоновской жидкости, $\text{Па} \cdot \text{с}$
$\rho$	плотность жидкости, $\text{кг/м}^3$
$\sigma$	касательное напряжение (напряжение сдвига), $\text{Па}$
$\sigma$	$\mu \dot{\gamma}$ , касательное напряжение ньютоновской жидкости при ламинарном режиме течения, $\text{Па}$
$\sigma_w$	касательное напряжение на стенке, $\text{Па}$
$\sigma$	$K \dot{\gamma}^n$ , касательное напряжение для степенной жидкости, $\text{Па}$
$K$	коэффициент кажущейся вязкости, $\text{Па} \cdot \text{с}^{-n}$
$n$	показатель степени в жидкостях, подчиняющихся уравнению (1.20), безразмерная величина
$\sigma = \sigma_0 + \mu_{PL} \dot{\gamma}$	касательное напряжение в жидкости Бингама при линейной зависимости вязкой компоненты $\mu_{PL} \dot{\gamma}$ , $\mu_{PL} = \mu$
$\sigma_0$	предел текучести при сдвиге, $\text{Па}$
$c$	отношение $(\sigma_0/\sigma_w)$ предела текучести при сдвиге к касательному напряжению на стенке, безразмерная величина
$\sigma = \sigma_0 + K \dot{\gamma}^n$	касательное напряжение в жидкости Гершеля–Балкли, $\text{Па}$
$N_{Re}(=Re)$	число Рейнольдса для ньютоновской жидкости, безразмерная величина
$N_{Re,PL}$	число Рейнольдса для жидкостей, подчиняющихся степенному закону, безразмерная величина
$N_{Re,B}$	число Рейнольдса–Бингама, безразмерная величина
$N_{He}$	число Хедстрёма, безразмерная величина
$N_{He,M}$	модифицированное число Хедстрёма для жидкостей Гершеля–Балкли, безразмерная величина; индекс «критическое» означает критическое значение этих чисел при переходе от ламинарного к турбулентному режиму течения
$f$	коэффициент трения по длине, безразмерная величина
$\delta P = P_1 - P_2$	перепад давления в трубе длиной $L$ , $\text{Па}$
$(\delta P)_p$	давление в насосе, $\text{Па}$
$W$	удельная работа насоса (на единицу массы жидкости), $\text{Дж/кг}$
$KЭ$	кинетическая энергия на единицу массы жидкости, $\text{Дж/кг}$
$\alpha$	коэффициент кинетической энергии, безразмерная величина
$y$	расстояние от стенки трубы до некоторой точки в поперечном сечении $R - r$ , $\text{м}$
$u^*$	$= \sqrt{\sigma_w / \rho} = \bar{u} \sqrt{f/2}$ , динамическая скорость («скорость трения»), $\text{м/с}$
$y^+$	$= u^* r y / K$ , безразмерная координата от стенки трубы, безразмерная величина
$u^+$	$= u / u^*$ , безразмерная скорость в долях от динамической скорости
$\beta$	константа в формуле для коэффициента местного сопротивления при ламинарном режиме течения
$k_f$	коэффициент местных сопротивлений при турбулентном режиме течения
$\lg$	десятичный логарифм

# Литература

1. Bird, R. B., Stewart, W. E., and Lightfoot, E. N. Transport Phenomena. — NY: John Wiley and Sons, 1960.
2. Brodkey, R. S. and Hershey, H. C. Transport Phenomena. — NY: McGraw-Hill, 1988.
3. Slurry Handling: Design of Solid-Liquid Systems / Brown, N. P. and Heywood, N. I. (eds.) — NY: Elsevier, 1991.
4. Clapp, R. M. Turbulent heat transfer in pseudoplastic non-Newtonian fluids, IIIA // Int. Dev. Heat Transfer, ASME, Part III, Sec. A. — 1961. — P. 652–661.
5. Flow of fluids through valves, fittings and pipe / Grane Co (300 Park Ave., New York). — Technical Paper No. 410M, 21st printing. — 1982.
6. Darby, R. and Melson, J. D. Direct determination of optimum economic pipe diameter for non-Newtonian fluids // J. Pipelines. — 1982. — № 2. — P. 11–21.
7. Denn, M. M., Process Fluid Mechanics. — Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1980.
8. Dodge, D. W. and Metzner, A. B. Turbulent flow of non-Newtonian systems // AIChE J. — 1959. — № 5(7). — P. 189–204.
9. Edwards, M. F., Jadallah, M. S. M., and Smith, R. Head losses in pipe fittings at low Reynolds numbers // Chem. Ing. Res. Des. — 1985. — № 63. — P. 343–350.
10. Garcia, E. J. and Steffe, J. F. Review of friction factor equations for non-Newtonian fluids in pipe flow, Special Report / Department of Agricultural Engineering. — MI: Michigan State University, East Lansing, 1986.
11. Garcia, E. J. and Steffe, J. F. Optimum economic pipe diameter for pumping Herschel–Bulkley fluids in Laminar flow // J. Food Proc. Eng. — 1986. — № 8(2). — P. 117–136.
12. Garcia, E. J. and Steffe, J. F. Comparison of factor equations for non-Newtonian fluids in tube flow // J. Food Proc. Eng. — 1987. — № 9(2). — P. 93–120.
13. Griskey, R. G. and Green, R. G. Flow of dilatant (shear-thickening) fluids // IAChE J. — 1971. — № 17(3). — P. 725–728.
14. Grovier, G. W. and Aziz, K. The Flow of Complex Mixtures in Pipes. — Malabar, FL: R. E. Krieger. — 1972.
15. Hanks, R. W. Laminar-turbulent transition of fluids with a yield stress // AIChE J. — 1963. — № 9(3). — P. 306–309.
16. Hanks, R. W. Low Reynolds turbulent pipe flow of pseudohomogenous slurries: Paper C-2 // Proc. 5th Int. Conf. on Hydraulic Transport of Solids in Pipes (Hydrotransport 5), Hannover, Federal Republic of Germany, May 8–11 / BHRA Fluid Engineering. — Bedford, England: Granfield, 1978.
17. Progress and Trends in Rheology, II / Giesekus, H. (Ed.) // Proceedings of the Second Conference of European Rheologists, Prague, June 17–20, 1986. — NY: Springer-Verlag, 1988. — P. 460–463.
18. Kittredge, C. P. and Rowley D. S. Resistance coefficients for laminar and turbulent flow through one-half inch valves and fittings // Trans. ASME. — 1957. — № 79. — P. 1759–1766.
19. Lewicki, P. P. and Skierkowski, K. Flow of fruit and vegetable purees through pipelines // Progress and Trends in Rheology, II / Giesekus, H. (Ed.) // Proceedings of the Second Conference of European Rheologists, Prague, June 17–20, 1986. — NY: Springer-Verlag, 1988. — P. 443–445.
20. Lord, D. L., Hulsey, B. W., and Melton, L. L. General Turbulent pipe flow scale-up correlation for rheologically complex fluids // Soc. Petrol. Engrs. J. — 1967. — № 7(3). — P. 252–258.
21. Metzner, A. B. Non-Newtonian technology: fluid mechanics, mixing, heat transfer // Advances in Chemical Engineering, Vol. 1 / Drew, T. B. and Hoopes, J. W. (Eds.). — NY: Academic Press, 1956.
22. Ofoli, R. Y., Morgan, R. G., and Steffe, J. F. A generalized rheological model for inelastic fluid foods // J. Texture Stud. — 1987. — № 18(3). — P. 213–230.
23. Osorio, F. A. and Steffe, J. F. Kinetic energy calculations for non-Newtonian fluids in circular tubes // J. Food Sci. — 1984. — № 49(5). — P. 1295–1296, 1315.

24. Viscoelastic Properties of Foods / Rao, M. A. and Steffe, J. F. (Eds.). — NY: Chapman and Hall, 1992.
25. Rozema, H. and Beverloo, W. A. Laminar isothermal flow of non-Newtonian fluids in circular pipe // *Lebensmitt. Wissenschaft und Technologie*. — 1974. — № 7. — S. 223–228.
26. Sakiadis, B. C. Fluid and particle mechanics // *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. — 6th ed., Sec. 5 / Perry, R. H., Green, D. W., and Maloney, J. D. (Eds.). — NY: McGraw-Hill, 1984.
27. Skelland, A. P. H. *Non-Newtonian Flow and Heat Transfer*. — NY: John Wiley and Sons, 1967.
28. Steffe, J. F. Problems in using apparent viscosity to select pumps for pseudoplastic fluids // *Trans. ASAE*. — 1984. — № 27(2). — P. 629–634.
29. Steffe, J. F. *Rheological Methods in Food Process Engineering*. — East Lansing, MI: Freeman Press. — 1992.
30. Steffe, J. F., Mohamed, I. O., and Ford, E. W. Pressure drop across valves and fittings for pseudoplastic fluids in laminar flow // *Trans. ASAE*. — 1984. — № 27(2). — P. 616–619.
31. Steffe, J. F. and Morgan, R. G. Pipeline design and pump selection for non-Newtonian fluid foods // *Food Technol.* — 1986. — № 40(12). — P. 78–85. [Addendum: *Food Technol.* 41(7):32].
32. Torrance, B. McK. Friction factors for turbulent non-Newtonian fluid flow in circular pipes // *South African Mech. Engr.* — 1963. — № 13. — P. 89–91.

## Дополнительная отечественная литература

1. Френкель Н. З. *Гидравлика*. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1956.
2. Идельчик И. Е. *Справочник по гидравлическим сопротивлениям (коэффициенты местных сопротивлений и сопротивления трения)*. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960.
3. Золотов С. С. *Гидравлика судовых систем*. — Л.: Судостроение, 1970.
4. Артюшков Л. С. *Динамика неньютоновских жидкостей*. — СПб.: Изд-во Санкт-Петерб. гос. морского техн. ун-та, 1997.
5. Астарита Дж., Маруччи Дж. *Основы механики неньютоновских жидкостей*. — М.: Мир, 1978.

# 2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СТЕРИЛИЗАЦИИ

*Хосагалли С. Памасвами, Р. Пол Сингх*

*Перевод с англ. Д. Рапопорта под ред. доктора техн. наук, проф. А. В. Красниковой, канд. техн. наук, доцента А. В. Куприяновой*

## Содержание

- 2.1 Введение
- 2.2 Принципы термообработки
- 2.3 Термостойчивость микроорганизмов
  - 2.3.1 «Кривая выживания» и значение  $D$
  - 2.3.2 Время термической гибели (ВТГ) и значение  $D$
  - 2.3.3 Температурная зависимость и значение  $z$
  - 2.3.4 Константа скорости реакции ( $k$ ) и энергии активации ( $E_a$ )
  - 2.3.5 Понятие «летальности»
- 2.4 Теплообмен при термообработке
  - 2.4.1 Теплопроводность
    - 2.4.1.1 *Теплопроводность при стационарных условиях*
    - 2.4.1.2 *Теплопроводность при нестационарных условиях*
    - 2.4.1.3 *Решение задачи теплопередачи при непостоянных условиях на примере объекта сферической формы*
  - 2.4.2 Конвективная теплоотдача
    - 2.4.2.1 *Конвективный перенос теплоты при стационарных условиях*
    - 2.4.2.2 *Конвективный перенос теплоты при нестационарных условиях*
  - 2.4.3 Характеристика данных по теплопроницаемости
  - 2.4.4 Параметры теплопроницаемости
  - 2.4.5 Время подготовки емкости
- 2.5 Расчеты термических процессов
  - 2.5.1 Классический метод общего характера
  - 2.5.2 Улучшенный классический метод
  - 2.5.3 Метод Болла
    - 2.5.3.1 *Корректировка времени подогрева и продолжительности технологического процесса по Боллу*
  - 2.5.4 Метод Стумбо
  - 2.5.5 Метод Фама

## Литература

Дополнительная отечественная литература

## 2.1 Введение

Традиционно термообработка включает в себя нагревание пищевых продуктов, упакованных в герметичные контейнеры, в течение заранее определенного времени и при заданной температуре для обезвреживания патогенных микроорганизмов, которые могут навредить здоровью потребителей, а также тех микроорганизмов и ферментов, которые способствуют порче продукта в течение срока хранения. Общая идея стерилизации пищевых продуктов в контейнерах зародилась довольно давно — с тех пор, когда Николас Эпперт в 1810 г. впервые упомянул об искусстве консервирования [10]. В настоящее время потребитель требует не только производства безопасных и стабильных при хранении пищевых продуктов, ему нужны продукты высокого качества, удобные в использовании. Для обеспечения надлежащего качества пищевых продуктов и минимизации трудностей тепловой обработки были разработаны способы *HTST* (ускоренной обработки при высокой температуре) и *UHT* (при сверхвысоких температурах). Преодолению этих трудностей помогает также ведение технологического процесса, включая фасовку, в асептических условиях посредством быстрого нагревания и охлаждения пищевых продуктов перед фасовкой и упаковкой. Для обеспечения высокой скорости теплопередачи (что позволяет уменьшить отрицательное влияние нагрева на качество пищевых продуктов), были разработаны тонкослойные, термостабильные, пригодные для обработки в микроволновых печах виды упаковок. При проектировании технологического процесса очень важно предусмотреть обеспечение требуемой термообработки продукта для различных способов стерилизации. Ниже приведено детальное рассмотрение принципов термообработки, а также методы ее расчета.

## 2.2 Принципы термообработки

Следует помнить, что термообработка не предназначена для уничтожения в упакованном продукте всех микроорганизмов. Такой процесс привел бы к ухудшению качества из-за необходимости слишком длительного нагревания. В герметически упакованном контейнере уничтожаются патогенные микроорганизмы, и внутри упаковки создается такая среда, которая не поддерживает рост плесневых микроорганизмов. Чтобы определить необходимую степень термообработки, необходимо знать ряд факторов [5]:

- тип и термоустойчивость присутствующих в продукте микроорганизмов, спор или ферментов;
- рН данного пищевого продукта;
- условия тепловой обработки;
- термофизические свойства данного пищевого продукта, а также форму и размеры упаковки;
- условия хранения пищевого продукта после соответствующей технологической обработки.

В пищевых продуктах содержатся различные микроорганизмы и/или ферменты, которые должны быть разрушены в ходе процесса термообработки. Для определе-

ния типа микроорганизма, на разрушение которого должен быть направлен процесс, следует рассмотреть ряд моментов. В герметически упакованных продуктах содержание кислорода минимально. Следовательно, такие условия не способствуют росту микроорганизмов, потребляющих кислород для роста плесеней или опасных для потребителей (облигатных аэробов). Таким образом, споры облигатных аэробных бактерий обладают меньшей термоустойчивостью, чем споры бактерий, растущих в анаэробных условиях (факультативные или облигатные анаэробы). Рост и активность таких анаэробных микроорганизмов существенно зависит от уровня кислотности.

В связи с этим пищевые продукты делятся на три группы в зависимости от кислотности:

- высококислотные ( $\text{pH} < 3,7$ ); в эту группу входят яблоки, яблочный сок, яблочный сидр, яблочное пюре, ягоды, вишни (кислых сортов), клюквенный сок, клюквенное пюре, фруктовые конфитюры, грейпфрутовый сок, грейпфрутовое пюре, лимонный сок, сок лайма, апельсиновый сок, сливовый и ананасовый соки, маринады, квашеная капуста, уксус);
- продукты средней кислотности ( $3,7 < \text{pH} < 4,5$ ); к этой группе относятся фруктовые джемы, фруктовый коктейль, грейпфруты, помидоры, томатный сок, персики, перец гвоздичный, ананасовые дольки, картофельный салат, сок из чернослива, овощной сок;
- низкокислотные ( $\text{pH} > 4,5$ ) — все мясные продукты, рыба, овощи и большинство супов.

Самое важное для термообработки — правильно провести границу между низкокислотными и продуктами средней кислотности. В большинстве лабораторий, имеющих дело с термообработкой, особое внимание уделяется *Clostridium botulinum*, очень термоустойчивому, палочкообразному микроорганизму, способному образовывать споры. Этот анаэробный патоген производит токсин ботулизма. Считается, что при степени кислотности ниже 4,6 *C. botulinum* не растет и не производит токсин, и поэтому  $\text{pH} 4,5$  принят в качестве «разграничительной линии между продуктами, относящимися к группе средней кислотности, и низкокислотными. С учетом этого при обработке продуктов средней кислотности ( $\text{pH} < 4,5$ ) можно не беспокоиться относительно *C. botulinum*. С другой стороны, в низкокислотных продуктах ( $\text{pH} > 4,5$ ) наиболее спорообразующим микроорганизмом, способным выжить в процессе термообработки, является именно *C. botulinum*, который прекрасно себя чувствует в анаэробных условиях, существующих в герметичном контейнере, и может образовывать сильный экзотоксин. Существуют и другие микроорганизмы, например, *B. stearothermophilus*, *B. thermoacidurans* и *C. thermosaccolyticum*, которые еще более термоустойчивы, чем *C. botulinum*. По своей природе они термофильны (оптимальная температура для их роста —  $50\text{--}55^\circ\text{C}$ ). Если обрабатываемый продукт хранится при температурах ниже  $30^\circ\text{C}$ , то он является безопасным по содержанию в нем этого вида микроорганизмов.

В 1977 г. американской комиссией по пищевым продуктам и лекарственным препаратам (FDA) был введен термин «процесс минимальной термообработки», который определяется следующим образом: «применение к пищевому продукту воздействия тепла как до, так и после упаковывания в герметичную тару, в течение того

времени и при той температуре, которые являются научно обоснованными для полного разрушения микроорганизмов, представляющих опасность для здоровья потребителей» [10]. *C. botulinum* — микроорганизм, представляющий опасность для здоровья потребителей при его присутствии в низкокислотных пищевых продуктах, поэтому с учетом его термоустойчивости для обработки подобных продуктов применяются обычно температуры порядка 115–125 °С. Что касается продуктов высококислотных и средней кислотности, процесс термообработки обычно направлен на термоустойчивые вегетативные бактерии или ферменты, которые легко разрушаются даже при температурах ниже 100 °С. Термообработка подобных продуктов, следовательно, легко осуществляется в кипящей воде.

## 2.3 Термоустойчивость микроорганизмов

Прежде чем определять процессы термообработки, необходимо идентифицировать наиболее устойчивые к воздействию тепла микроорганизмы или ферменты, на подавление которых должен быть направлен данный процесс. Для этого требуется знать микробиологическую историю данного пищевого продукта и условия, при которых он хранится. Следующим шагом является оценка термоустойчивости данного тест-микроорганизма, которая выявляется при соблюдении тех же условий. Чтобы использовать данные о термическом разрушении при расчете процесса термообработки, их следует представить в виде соответствующей модели. Поскольку расфасованные пищевые продукты сразу же не могут быть нагреты до требуемых температур, необходимы также данные о зависимости скорости разрушения микроорганизма от температуры. Это поможет выявить эффективность разрушения по мере изменения температуры в условиях производства. Обзор различных методов экспериментальной оценки кинетики термического разрушения микроорганизмов приведен в работах [13, 22].

### 2.3.1 Скорость разрушения микроорганизмов и «кривая выживания»

Согласно опубликованным данным о термическом разрушении микроорганизмов, оно обычно происходит в соответствии с реакцией первого порядка, свидетельствующей о логарифмической зависимости скорости их гибели от времени. Другими словами, логарифм количества микроорганизмов, выживших при данных условиях термообработки при определенной температуре, соотнесенный со временем теплового воздействия (так называемая «кривая выживания»), дает на графике прямую линию (рис. 2.1). Скорость разрушения микроорганизмов обычно определяется в терминах «значения *D*» (*Decimal reduction time*, времени сокращения численности в десять раз), представляющего собой время выдержки в минутах при данной температуре, при котором популяция выживших микроорганизмов сокращается в 10 раз. Иначе говоря, значение *D* означает время термообработки, при котором 90% имеющихся микроорганизмов погибает. На графике это представляет временной промежуток, в котором кривая выживания проходит один логарифмический цикл (см. рис 2.1).

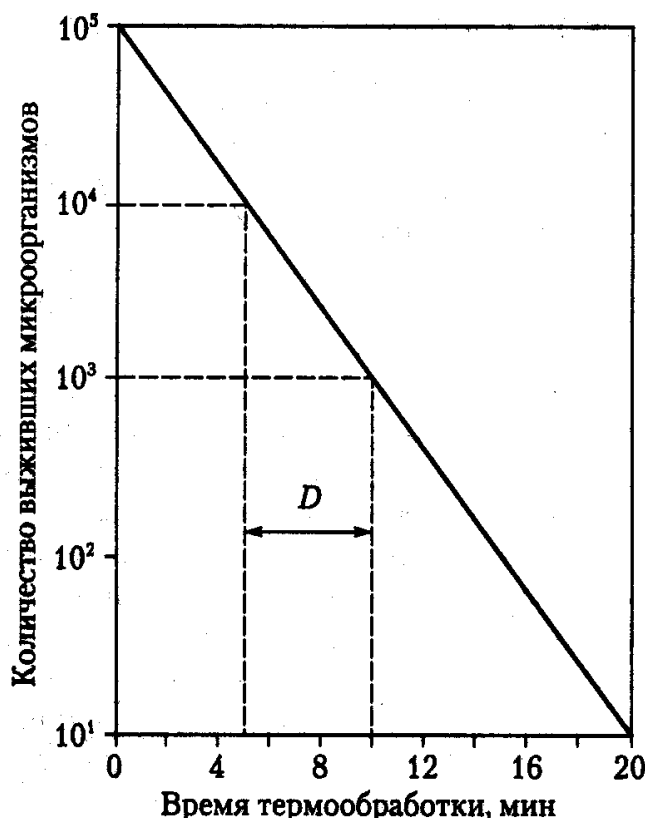


Рис. 2.1. Типичная кривая выживания

Математическое значение  $D$  можно представить в виде формулы

$$D = (t_2 - t_1) / [\lg(a) - \lg(b)], \quad (2.1)$$

где  $a$  и  $b$  соответствуют количеству микроорганизмов, переживших нагрев в течение соответственно  $t_1$  и  $t_2$  мин.

Логарифмическая природа кривой выживания или разрушения свидетельствует о том, что полного уничтожения популяции микроорганизмов добиться теоретически невозможно, так как даже после бесконечного количества значений  $D$  результат деления не будет равен нулю. На практике рассчитываемые остаточные популяции рассматриваются в рамках вероятностного подхода — например, пережившая термообработку популяция в  $10^{-8}$  единиц свидетельствует об одном выжившем микроорганизме из  $10^8$ , подвергнутых термообработке.

Традиционно в термообработке кривые выживания вычерчиваются на специальных листах миллиметровки, позволяющих легко обрабатывать результаты. Количество выживших микроорганизмов откладывают по логарифмической оси ординат относительно времени, отражаемому на линейной оси абсцисс. Промежуток времени, в течение которого прямой участок линии проходит через логарифмический цикл, принимается за «значение  $D$ ». При проектировании можно подготовить компьютерный график на основании рабочего листа  $\lg N/t$  и запустить программу линейной регрессии  $\lg N/t$  в том диапазоне, в котором нанесенные на график точки образуют относительно прямую линию. Обратный уклон подобного уравнения регрессии для прямой и дает значение  $D$ . Для правильного выбора диапазона регрессии перед ее выполнением желательно визуально проконтролировать точки данных.



### 2.3.2 Время термической гибели и значение $D$

В микробиологии пищевых продуктов обычно используется другой термин, а именно время термической гибели (ВТГ), и он несколько противоречит принципу, основанному на логарифмической зависимости скорости гибели микроорганизмов от времени термообработки. ВТГ — это время термообработки, требуемое для полного уничтожения некоторой популяции микроорганизмов. Эти данные получают, подвергая популяцию микроорганизмов нескольким сериям тепловой обработки при данной температуре и подсчитывая их количество. Кроме того, ВТГ представляет некоторое время, меньшее самого короткого промежутка времени уничтожения и самого продолжительного времени выживания. Разница между двумя вышеуказанными промежутками последовательно сокращается, и для получения оценки ВТГ выводится геометрическое среднее. Понятие «гибель» в этом случае обычно указывает на отсутствие роста данной популяции микроорганизмов в культуральной среде после применения термообработки. Сравнив подход на основе ВТГ с подходом, основанным на десятикратном сокращении популяции, можно легко заметить, что значение ВТГ зависит от начальной бактериальной нагрузки (тогда как значение  $D$  от нее не зависит). Кроме того, если ВТГ всегда измерять на основе стандартной бактериальной нагрузки или ее уменьшения, то оно представляет собой просто некоторое кратное значений  $D$ . Например, если ВТГ представляет время, необходимое для уменьшения данной популяции с  $10^9$  до  $10^{-3}$ , то ВТГ является мерой 12 значений  $D$ . Другими словами,

$$\text{ВТГ} = n D, \quad (2.2)$$

где  $n$  — количество сокращений популяции в десять раз.

Следует отметить, что для отступления от логарифмического подхода при построении кривой выживания имеются серьезные причины. В общем случае в начале периода термообработки существует некоторое время задержки (лаг-фаза), в течение которого поведение первого порядка не соответствует наблюдаемым данным, и зачастую подобное отклонение встречается также на конце кривой выживания. Некоторые факторы, вызывающие явные отклонения от логарифмического принципа гибели микроорганизмов, приведены в работе [22], где показаны типичные кривые выживания для каждой ситуации, а именно:

- активация теплом для прорастания спор;
- смешанная флора;
- скопления клеток;
- флокуляция в ходе термообработки;
- дефлокуляция в ходе термообработки;
- природа культуральной среды;
- анаэробноз.

В этой же работе был выделен ряд факторов, влияющих на термоустойчивость бактерий, в частности, условия, существующие в ходе спорообразования (температура, ионный характер среды, органические компоненты, липиды, возраст, фаза роста), и условия в ходе термообработки (кислотность и буферные компоненты, ионный характер среды, активность воды, состав среды).

### 2.3.3 Температурная зависимость и показатель температурной чувствительности

Значение  $D$  сильно зависит от температуры, и чем она выше, тем меньше значение  $D$ . Зависимость значений  $D$  от температуры при различных температурах обычно выражают в виде кривой термической устойчивости, где значения  $\lg D$  сопоставляются со значениями температуры (рис. 2.2). Значение показателя температурной чувствительности  $z$  является температурным диапазоном, в котором происходит десятикратное изменение значения  $D$ , или на логарифмическом графике — температурном диапазоне, в котором кривая значений  $D$  проходит один логарифмический цикл. Применяя приемы регрессии, значение  $z$  можно получить как отрицательный обратный уклон кривой термической устойчивости (регрессия значений  $\lg D$  относительно температуры).

Математически

$$z = (T_2 - T_1) / [\lg(D_1) - \lg(D_2)], \quad (2.3)$$

где  $D_1$  и  $D_2$  — значения  $D$  при  $T_1$  и  $T_2$  соответственно.

Значение  $D$  при каждой данной температуре можно получить из модифицированной формы вышеприведенного уравнения, используя контрольное значение  $D$  ( $D_0$  при контрольной температуре  $T_0$  — для термической стерилизации обычно 250 °F):

$$D = D_0 10^{(T_0 - T)/z}. \quad (2.4)$$

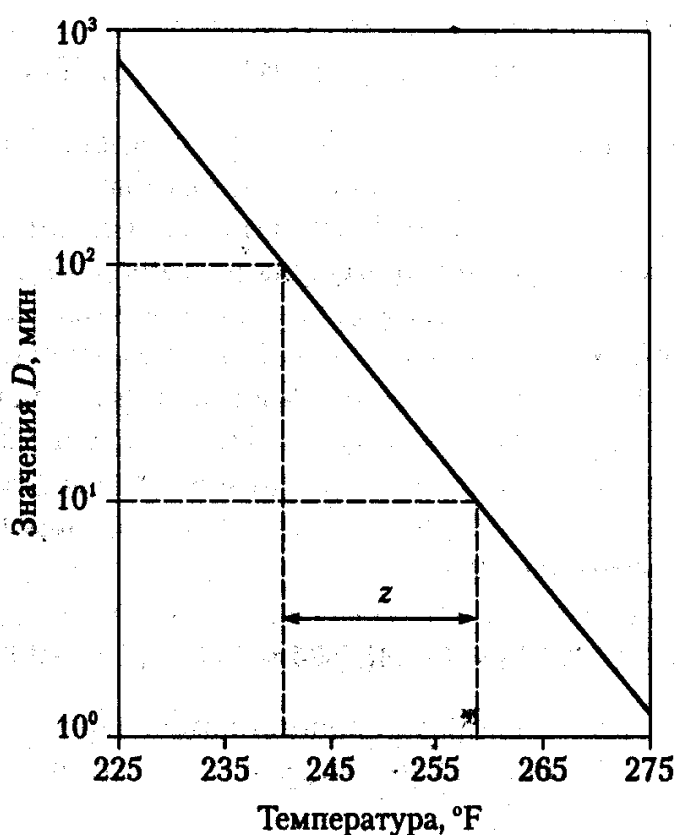


Рис. 2.2. Типичная кривая термической устойчивости

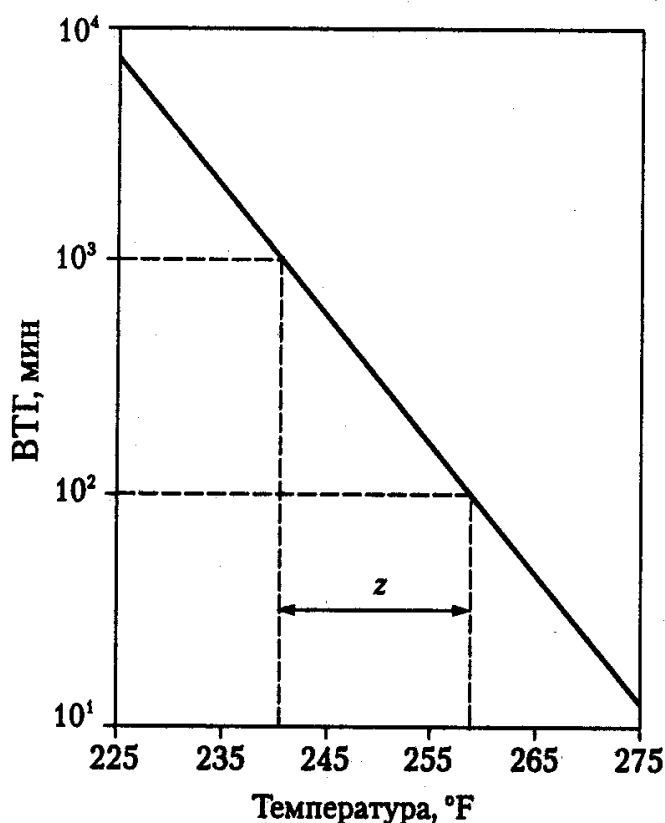


Рис. 2.3. Типичная кривая ВТГ

Уравнение (2.3) можно записать также применительно к значениям ВТГ, и значение  $z$  может быть получено из

$$z = (T_2 - T_1) / (\lg \text{ВТГ}_1 - \lg \text{ВТГ}_2), \quad (2.5)$$

где  $\text{ВТГ}_1$  и  $\text{ВТГ}_2$  — значения ВТГ при  $T_1$  и  $T_2$  соответственно. Графически (аналогично методу получения значения  $D$ ) значение  $z$  может быть получено как обратный уклон кривой  $\lg \text{ВТГ}$  относительно температуры, взятый с обратным знаком (рис. 2.3). При использовании данного подхода рекомендуется наносить на график самые продолжительные периоды времени выживания и самые короткие промежутки времени уничтожения (по логарифмической шкале) относительно температуры (по линейной шкале). Линия регрессии получается на базе оценки ВТГ так, как это было описано выше. Как отмечается в работе [13], следует убедиться, что кривая ВТГ лежит выше всех точек с данными о выживаемости (выше по температуре или продолжительнее по времени). Кривая ВТГ должна быть параллельна экспериментальной кривой выживания и гибели.

### 2.3.4 Константа скорости реакции и энергии активации $E_a$

Скорость термического разрушения микроорганизмов первого порядка выражается иногда также термином константа скорости реакции  $k$ , которую получают по модели первого порядка

$$\log_e(N/N_0) = -kt, \quad (2.6)$$

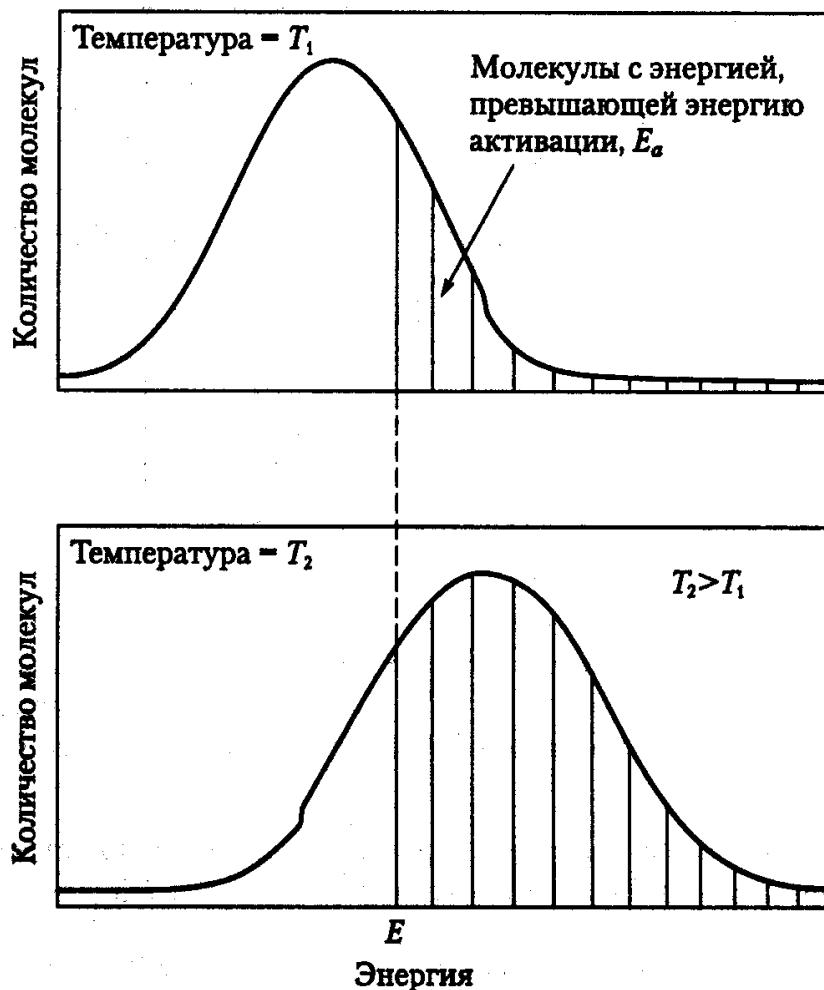


Рис. 2.4. Распределение энергии между молекулами

которую можно упростить до

$$k = D/2,303. \quad (2.7)$$

Некоторые теории предполагают существование нескольких моделей для описания влияния температуры на скорости реакции. Наиболее известная и, возможно, самая применяемая теория в области биоинженерии была предложена Аррениусом, и она применима к реакциям, происходящим в растворах, а также для гетерогенных процессов. С учетом законов классической механики предполагается, что в любой системе в каждый момент времени между молекулами существует некоторый уровень распределения энергии (рис. 2.4).

Молекула, вступающая в некоторую реакцию, должна обладать определенным минимальным количеством энергии, называемым энергией активации ( $E_a$ ). Среднее значение частотного распределения уровней молекулярной энергии является функцией температуры (см. рис. 2.4). Вероятность того, что некоторая молекула будет обладать энергией, превышающей энергию активации на моль при температуре  $T$  (абсолютной), равна  $e^{-E_a/RT}$ , где  $R$  — универсальная газовая постоянная (рис. 2.5).

Для осуществления некоторой реакции молекулы, способные вступить в эту реакцию и обладающие энергией, равной или превышающей  $E_a$ , должны встретиться

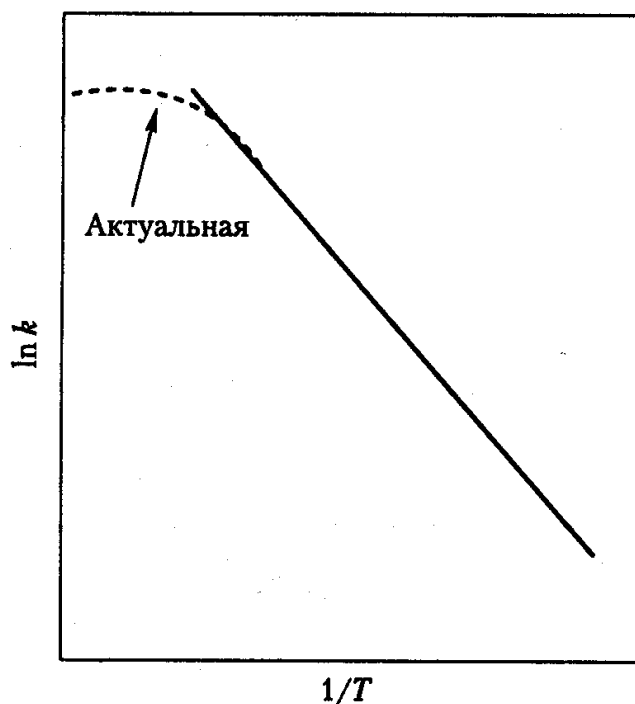


Рис. 2.5. Типичный график Аррениуса:  $\ln k$  относительно абсолютной температуры

друг с другом. Таким образом, согласно Аррениусу, если частота встречи таких молекул равна  $k_0$ , то зависимость  $k$  от абсолютной температуры  $T$  будет

$$k = k_0 e^{-E_a / RT} \quad (2.8)$$

График Аррениуса представляет собой зависимость натурального логарифма константы скорости реакции. Типичный график Аррениуса приведен на рис. 2.5, а  $E_a$  можно рассчитать по такому графику как произведение уклона прямой, взятого с обратным знаком, на универсальную газовую постоянную ( $\text{tg } \alpha \times R$ ). Часто говорят, что модель Аррениуса совершеннее модели, основанной на расчете значений  $z$  (модель Бигелу), поскольку  $z$  зависит от температуры, тогда как  $E_a$  — нет. Вместе с тем не стоит их сравнивать так упрощенно. Следует заметить однако, что если  $E_a$  предполагается постоянной, график  $\ln k$  относительно  $1/T$  не всегда дает прямую линию. В некоторых работах было показано, что применительно к процессам термообработки могут быть использованы оба этих метода. Обычно значение  $z$  соотносят с  $E_a$  с помощью уравнения

$$E_a = 2,303RT^2/z, \quad (2.9)$$

где  $E_a$  — энергия активации;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $T$  — абсолютная температура.

Тем не менее преобразовывая значение  $z$  в  $E_a$  и наоборот, следует соблюдать осторожность, поскольку возникающие при таких преобразованиях ошибки являются функциями от выбранной контрольной температуры и используемых диапазонов температур (см. [18]). Вероятность ошибки можно минимизировать, заменив  $T^2$  произведением минимальной  $T_{\min}$  и максимальной  $T_{\max}$  температур того температурного диапазона, в пределах которого были получены кинетические данные, то есть  $T^2 = T_{\min} \cdot T_{\max}$ .

### 2.3.5 Понятие «летальности»

Летальность (значение  $F$ ) является мерой тепловой обработки или процесса стерилизации. Для сравнения относительной стерилизационной способности процесса тепловой обработки необходимо определить единицу летальности. Для удобства ее определяют как эквивалент тепловой обработки в течение 1 мин при контрольной температуре, для процесса стерилизации обычно равной 250 °F (121,1 °C). Таким образом, значение  $F$  представляет собой производное от значения  $D$ , зависящее от типа того или иного микроорганизма; следовательно, для расчета значения  $F$  имеет место уравнение типа (2.5)

$$F = F_0 10^{(T_0 - T)/z} \quad (2.10)$$

В данном случае  $F_0$  — это значение  $F$  при контрольной температуре ( $T_0$ ).

Контрольная (воображаемая) кривая ВТГ определяется как кривая, параллельная реальной кривой ВТГ или кривой термоустойчивости (то есть с тем же значением  $z$ ) и принимающая ВТГ (значение  $F$ ) за 1 мин при 250 °F. При наличии определенной таким образом воображаемой кривой ставится возможным выразить летальный эффект (или «летальность»  $F_0$ ) любого сочетания «температура–время» при условиях, эквивалентных минутам при 250 °F.

$$F_0 = F / 10^{(T - T_0)/z} \quad (2.11)$$

Следовательно, значение  $F$  при тепловой обработке в течение 10 мин при 240 °F эквивалентно  $F_0$  в течение 2,78 мин, тогда как значение  $F$  при тепловой обработке в течение 10 мин при 260 °F эквивалентно  $F_0$  в течение 35,9 мин (когда  $z = 18$  °F). В подобных ситуациях предполагается, что нагрев до соответствующих температур и последующее охлаждение являются мгновенными. Для реальных процессов, когда пищевой продукт в течение определенного времени испытывает температурные изменения (температурно-временной профиль), следует добиться возможности использовать это понятие для интеграции летального эффекта в ходе различного сочетания «время–температура». Полученная таким образом для некоторого технологического процесса «сочетанная летальность» называется технологической летальностью и обозначается символом  $F_0$ . Кроме того, с учетом конкретной технологической ситуации летальность может быть выражена применительно к данному участку технологической линии (обычно участку термообработки) или применительно к любому другому произвольно выбранному месту (или к сумме летальностей во всех точках внутри тары). В терминах микробиологической чистоты особую важность приобретает достижение минимальной летальности на участке термообработки, а с точки зрения качества желательного минимизировать общие показатели внутри тары.

Критерий адекватности некоторого технологического процесса должен основываться на двух микробиологических положениях: во-первых, разрушение популяции микроорганизмов, представляющих опасность для здоровья человека, и, во-вторых, сокращение числа бактерий, вызывающих порчу продукта. Для низкокислотных пищевых продуктов таким опасным для человека микроорганизмом является *C. botulinum*, и поэтому степень разрушения его спор используется в качестве критерия

чистоты того или иного технологического процесса. Следует еще раз упомянуть, произвольно выбранное минимальное требование к процессу — это сокращение популяции *C. botulinum* в течение не менее 12 уменьшений их количества в 10 раз. Судя по опубликованным данным, для *C. botulinum* время одного уменьшения популяции в 10 раз составляет 0,21 мин при 250 °F [22]. 12-кратное подобное уменьшение будет, таким образом, эквивалентно значению  $F_0 = 12 \cdot 0,21 = 2,52$  мин. Следовательно, минимально необходимая технологическая летальность  $F_0$  составит 2,52 мин. Некоторые низкокислотные продукты обрабатывают дольше этого минимального времени (около 5 мин). Причина этому — наличие более термоустойчивых микроорганизмов, вызывающих порчу продукта, но не представляющих опасности для здоровья человека. Среднее значение  $D_0$  для подобных микроорганизмов может достигать 1 мин. В таком случае значение  $F_0 = 5$  мин может быть удовлетворительным только в том случае, если требуется достичь обработки этих микроорганизмов в  $5D$ . Поэтому важно контролировать качество сырья так, чтобы поддерживать начальное количество таких микроорганизмов в среднем ниже 100 кое на единицу тары и снизить процент порчи до 1 консервной банки на 1000 (от  $10^2$  до  $10^{-3} = 5D$ ).

## 2.4 Теплообмен при термообработке

Скорость нагревания некоторого объекта или пищевого продукта в таре зависит от геометрической формы данного объекта или контейнера, его физических свойств и характеристик теплообмена. Существует три возможных механизма передачи теплоты термически обрабатываемым пищевым продуктам: а) благодаря теплопроводности, б) конвекционный или в) прерывистый (представляющий собой последовательную комбинацию теплопроводности и конвекции или конвекции и теплопроводности). Некоторыми факторами, определяющими механизм передачи теплоты (конвективный или посредством теплопроводности), являются природа или плотность пищевого или фармацевтического продукта, наличие в нем мелких частиц, а также использование в отделочном жидкостном слое уплотняющих веществ и сахаров.

Нагревая или охлаждая объекты или продукты в контейнере, мы имеем дело с непостоянными процессами передачи теплоты, которые в математическом смысле довольно сложны. Тем не менее после вывода определенных уравнений их можно упростить так, что их применение оказывается не слишком сложным. Подобные процедуры упрощения очень полезны в расчете процессов передачи теплоты при стерилизации пищевых продуктов (см. [2]). Ниже мы кратко рассмотрим математический аспект теплопроводности и конвективного механизма передачи теплоты при нестационарных условиях.

### 2.4.1 Теплопроводность

#### 2.4.1.1 Теплопроводность при стационарных условиях

Фундаментальным уравнением для теплопроводности является закон Фурье:

$$dQ = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} dF, \quad (2.12)$$



где  $dQ$  — тепловой поток;  $F$  — площадь поперечного сечения, перпендикулярного потоку теплоты;  $-\frac{\partial t}{\partial x}$  — скорость изменения температуры с увеличением расстояния в направлении движения теплового потока, то есть градиент температуры; коэффициент  $\lambda$  представляет собой теплопроводность и зависит от свойств данного материала, через который проходит теплота.

Для стационарного потока тепла  $dQ$  постоянно, и его можно заменить на  $q$  (удельный тепловой поток, или плотность теплового потока,  $BTU/ч$ , или  $W$ ). Если  $\lambda$  и  $F$  не зависят от температуры  $T$  и расстояния  $x$ , то вышеприведенное уравнение примет вид

$$Q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x}. \quad (2.13)$$

#### 2.4.1.2 Теплопроводность при нестационарных условиях

Для нестационарных условий дифференциальное уравнение теплопроводности для трехмерного температурного поля имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \alpha \nabla^2 T, \quad (2.14)$$

где  $T$  — температура;  $\tau$  — время;  $x, y, z$  — координаты;  $\alpha = \lambda / c\rho$  — коэффициент температуропроводности.

Вышеприведенное уравнение подразумевает следующие допущения: 1) температура продукта в начале нагрева одинакова; 2) температура поверхности 3D-тела после начала нагревания также постоянна; 3) термическое рассеяние данного продукта  $\alpha$  постоянно относительно времени, температуры и места расположения в нагреваемом теле. Примерами пищевых продуктов, в которых теплота передается путем теплопроводности, могут служить плотно упакованные твердые продукты или очень вязкие жидкие и полужидкие пищевые продукты типа овощных пюре, мясных фрикаделек в собственном соку и т. п.

#### 2.4.1.3 Решение задачи теплопередачи в нестационарных условиях на примере объекта сферической формы

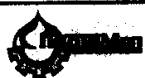
Дифференциальное уравнение в частных производных для сферы в сферических координатах представляет собой

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (2.15)$$

где  $r$  — радиус данной сферы.

Решение для пространственной температуры в виде бесконечного последовательного суммирования даст

$$\frac{T_1 - T}{T_1 - T_i} = \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{2(\sin \mu_n - \mu_n \cos \mu_n)}{\mu_n - \sin \mu_n \cos \mu_n} \cdot \frac{r \cdot \sin \left( \mu_n \frac{x}{r} \right)}{x \cdot \mu_n} e^{-\mu_n^2 F_0}, \quad (2.16)$$





где  $x$  — координаты, а  $\mu_n$  —  $n$ -й корень уравнения

$$B_i = 1 - \beta_i \cot \beta_i. \quad (2.17)$$

Общепризнано, что после непродолжительного времени нагревания (то есть при числе Фурье ( $F_0$ ,  $\alpha t/r^2 \geq 0,2$ )) вышеприведенный ряд сводится лишь к его первому члену. Таким образом, аппроксимация первого порядка может быть записана в виде

$$\frac{T_{x,r} - T_c}{T_{\text{нач}} - T_c} = \frac{2(\sin \mu_1 - \mu_1 \cos \mu_1)}{\mu_1 - \sin \mu_1 \cos \mu_1} \cdot \frac{r \cdot \sin\left(\mu_1 \frac{x}{r}\right)}{x \cdot \mu_1} e^{-\mu_1^2 F_0}, \quad (2.18)$$

где  $T_{x,r}$  — искомая температура,  $T_{\text{нач}}$  — начальная температура, а  $T_c$  — температура среды, и

$$B_i = 1 - \beta_i \cot \beta_i. \quad (2.19)$$

В большинстве процессов термообработки процесс нагревания характеризуется показателем скорости нагрева  $f_h$  и коэффициентом задержки (лаг-фактором)  $j_{ch}$  (о нем мы поговорим ниже). Представив  $f_h$  и  $j_{ch}$  в виде нижеприведенных уравнений (2.20) и (2.21), уравнение распределения температур в данной сфере может быть записано так, как показывает уравнение (2.22):

$$[(T_1 - T)/(T_1 - T_i)] = j_{ch} 10^{-t/f_h}, \quad (2.20)$$

$$j_{ch} = [2(\sin \mu_1 - \mu_1 \cos \mu_1)/(\mu_1 - \sin \mu_1 \cos \mu_1)][\sin(\mu_1 x/r)/(\mu_1 x/r)], \quad (2.21)$$

$$f_h = [\mu_1^2 \alpha / 2,303 r^2]. \quad (2.22)$$

Более подробное описание уравнений для тел иной геометрии приведено в работе [2].

## 2.4.2 Конвективная теплоотдача

Передача тепловой конвекции подразумевает перенос теплоты с одного места на другое посредством физического движения или потока жидкости. Когда поток рабочей жидкости целиком обусловлен разницей в ее плотности как результатом изменений температуры, такой перенос называется свободной конвекцией, а если поток жидкости обусловлен нагнетанием (действием насоса/вентилятора) или действием иного механического устройства, то перенос теплоты называют вынужденной конвекцией. Поскольку передача теплоты с помощью конвекции подразумевает изменения в потоке жидкости и тепловой энергии, они требуют внимательного и строгого научного анализа. Тем не менее, поскольку передача теплоты во многих технологических про-



цессах очень важна, были созданы специальные эмпирические процедуры и модели для проектирования.

#### 2.4.2.1 Конвективный перенос теплоты при стационарных условиях

В природе существует много примеров передачи теплоты при стационарных условиях. В подобных системах скорость теплового потока является постоянной и/или тепло передается в одном прямом направлении, так что передачу теплоты легко сравнивать с ее показателями при нестационарных условиях.

#### 2.4.2.2 Конвективный перенос теплоты при нестационарных условиях

При нестационарных условиях передачи теплоты в замкнутых пространствах или в ограниченных объемах жидкости температура в разных точках со временем меняется. Скорость потока жидкости внутри замкнутого объема определяется характеристиками пищевого продукта, включая его вязкость. Большое влияние на скорость нагревания или охлаждения жидкости внутри контейнера играет скорость передачи теплоты от внешнего источника или к нему через стенки тары или контейнера. Важнейшим фактором для скорости передачи теплоты является толщина пограничного слоя между потоком жидкости и стенкой. Этот малоподвижный слой или зона переменной скорости потока оказывает существенное сопротивление теплообмену. Следовательно, в конвективных процессах переноса теплоты следует определять пленочный коэффициент между стенкой и жидкостью. При его расчете для различных жидких сред при разных физических условиях используются эмпирически полученные формулы. Нижеприведенное уравнение описывает скорость теплового потока через стенку по направлениям в или от контейнера:

$$dQ = \alpha(T_1 - T)dF, \quad (2.23)$$

где  $\alpha$  — общий коэффициент теплоотдачи.

При нагревании жидкостей в замкнутых или ограниченных объемах изменение в количестве тепла в жидкости на единицу времени является функцией массы жидкости (плотности  $\rho$  на объем  $V$ ), удельной теплоемкости  $C_p$  и средней температуры  $T$ . Предполагая идеальную термическую конвекцию внутри контейнера с продуктом, указанные переменные могут быть связаны следующим уравнением:

$$dQ = \rho \cdot V \cdot C_p \frac{dT_{cp}}{d\tau}. \quad (2.24)$$

Решение задачи конвективной теплоотдачи при нестационарных условиях обычно получают, пользуясь законом Ньютона: изменение температуры в продукте рассчитывают, исходя из предположения, что поток тепла, направленный внутрь контейнера, поглощается его содержимым. Из уравнений (2.23) и (2.24) получим:

$$\alpha(T_1 - T)F = \rho V \cdot C_p \frac{dT}{d\tau}. \quad (2.25)$$



Отделив переменные и интегрируя по температуре и времени, получим:

$$\frac{(T_1 - T)}{(T_1 - T_i)} = \exp(-\alpha F / \rho V C_p) \quad (2.26)$$

или

$$\frac{(T_1 - T)}{(T_1 - T_i)} = 10^{-\alpha F / 2,303 \rho V C_p}, \quad (2.27)$$

или в терминах температуры и времени

$$(T_1 - T)/(T_1 - T_i) = 10^{-[UA/(2,303 \rho C_p V)]t} \quad (2.28)$$

Заменяв выражение в квадратных скобках на  $1/f_h$ , получаем сокращенную форму данного уравнения

$$(T_1 - T)/(T_1 - T_i) = 10^{-t/f_h}, \quad (2.29)$$

сходную с уравнением теплопроводности (2.20) в случае с  $j_{ch} = 1,0$ . Следует отметить, что уравнение (2.29) было получено исходя из предположения, что система удовлетворяет закону Ньютона о нагревании/охлаждении. Конвективное нагревание при этих идеальных условиях подразумевает в нулевой точке времени пошаговое изменение температуры теплоносителя и мгновенную поверхностную реакцию на новую температуру. При идеальных условиях отсутствуют градиенты температуры внутри нагреваемого тела, и эти условия встречаются только при его бесконечно малых объемах. В этом случае число Био (Biot) будет равно нулю.

В случае принудительно возбуждаемых систем (принудительная конвекция) тепловые характеристики в контейнере могут существенно отличаться от систем с натуральной конвекцией. По сравнению с идеальной системой тепловые характеристики принудительно возбуждаемых систем отличаются незначительно. Для контейнера с принудительным возбуждением уже разработаны модели потока на момент начала нагревания для практического использования. Все сопротивление передаче теплоты и результирующий температурный градиент сосредоточены в неподвижном слое продукта, прилегающем к стенке, а в массе продукта температурный градиент отсутствует. С другой стороны, в контейнере без принудительного возбуждения (в неподвижной среде) для установления той или иной модели потока жидкости, вызванного изменением температуры, требуется некоторый конечный период времени. В массе жидкости температурный градиент продолжает существовать даже после того, как установится модель потока. В подобных системах со свободной конвекцией движущая сила для потока жидкости уменьшается с уменьшением температурного градиента, и система постепенно достигает температуры теплоносителя. Такое явление вынуждает значение  $f_h$  увеличиваться по мере увеличения времени нагрева, и, в свою очередь, это может привести к появлению отсекающего значения на кривой нагрева.



Общепризнано, что и для теплопроводности, и для конвективных процессов тепловой обработки пищевых продуктов удобнее всего использовать экспериментальные данные по нагреву/охлаждению, предложенные в работе [1]. Этот подход мы подробнее рассмотрим в следующем разделе.

### 2.4.3 Характеристика данных по теплопроницаемости

Для обоснования графиков процессов термообработки в дополнение к характеристикам термического сопротивления данного микроорганизма ( $z$  и  $F_0$ ) необходима информация о «температурной истории» продукта, подвергающегося тепловому воздействию. Эта «температурная история» продукта зависит от нескольких факторов:

- собственно технологии процесса (приготовление в перемешиваемой или перемешиваемой массе, в упаковке или при асептическом приготовлении);
- теплоносителя (пар, вода (распыляемая или поток) под избыточным давлением воздуха или без него, паровоздушная смесь);
- условий термообработки (температура в емкости, начальная температура, способ загрузки);
- тип продукта (твердый, полутвердый, жидкий, частично жидкий; теплофизические свойства данного продукта);
- тип контейнера (тары), его форма и размеры.

Тепловая обработка может применяться к уже расфасованным и упакованным продуктам как традиционным способом (в консервных банках), так и путем нагревания и охлаждения пищевых продуктов, расфасовываемых в стерильную упаковку в асептических условиях (асептическая обработка). Последнее позволяет осуществлять быстрое нагревание и охлаждение продукта, а также ведение ускоренной обработки в условиях высоких температур (*HTST*), в связи с чем в большинстве случаев достигается лучшее качество продукта. Перемещение контейнеров в ходе технологического процесса позволяет лучше перемешивать их содержимое, что способствует более быстрому и однородному нагреву продукта. Таким образом, обработка с принудительным перемешиванием позволяет сократить время обработки и получить продукт более высокого качества. Ниже мы рассмотрим некоторые принципы подобной технологии, которые применимы как к продуктам, расфасовываемым в асептических условиях, так и к продуктам, обрабатываемым в емкостях с принудительным перемешиванием.

Как было отмечено выше, основным режимом теплопередачи при тепловой обработке твердых тел является теплопроводность, а в жидких средах — конвективный режим. Однако упакованные пищевые продукты нагреваются не чисто теплопроводностью и не чисто конвективным способом. Плотно упакованные твердые продукты и продукты повышенной вязкости, характеризующиеся начальной лаг-фазой и полулогарифмической кривой нагрева в форме прямой линии, обычно относят к продуктам, нагреваемым благодаря теплопроводности. Во время нагревания или охлаждения они не перемещаются внутри контейнера (упаковки). Жидкие же продукты, продукты с относительно небольшой вязкостью и жидкие продукты, содержащие свободные твердые частицы, характеризующиеся также полулогарифмической кри-



вой, но обычно с большим уклоном, относят к конвективно нагреваемым продуктам. В процессе нагрева и охлаждения продукты подобного типа обычно находятся в непрерывном движении, характерном для конвективного нагрева. Кроме двух описанных выше типов существуют такие пищевые продукты, которые характеризуются прерывистым поведением: сначала они нагреваются конвективно, а затем, после достижения определенной температуры, меняют свое поведение и нагреваются посредством теплопроводности. Такое поведение обычно свойственно продуктам, содержащим крахмал или другие связывающие вещества — из-за желатинизации крахмала при повышении температуры.

Для сбора данных о времени и температуре в ходе термообработки обычно размещают термопару (наиболее распространенное устройство для измерения температуры) в центре цилиндрического контейнера (для пищевых продуктов с нагреванием вследствие теплопроводности) и вдоль вертикальной оси на расстоянии  $1/10$  от низа (для продуктов с конвективным типом нагрева). Несложные кривые зависимости «время–температура» в течение нагрева и охлаждения для продуктов теплопроводного и конвективного типа приведены на рис. 2.6. Такой тип данных используется в общих методах расчета технологического процесса. С другой стороны, большинство формульных методов используют данные о теплопроницаемости ( $f_h$  и  $j_{ch}$ ), полученные из графика логарифма температурной разницы между температурой емкости  $T_r$  и температурой продукта  $T$ , [то есть  $\log(T_r - T)$ ] относительно времени нагрева, как это показано на рис. 2.7. Это же можно получить путем построения графика зависимости в полулогарифмических координатах  $\lg(T_r - T)$  от времени. Показатель

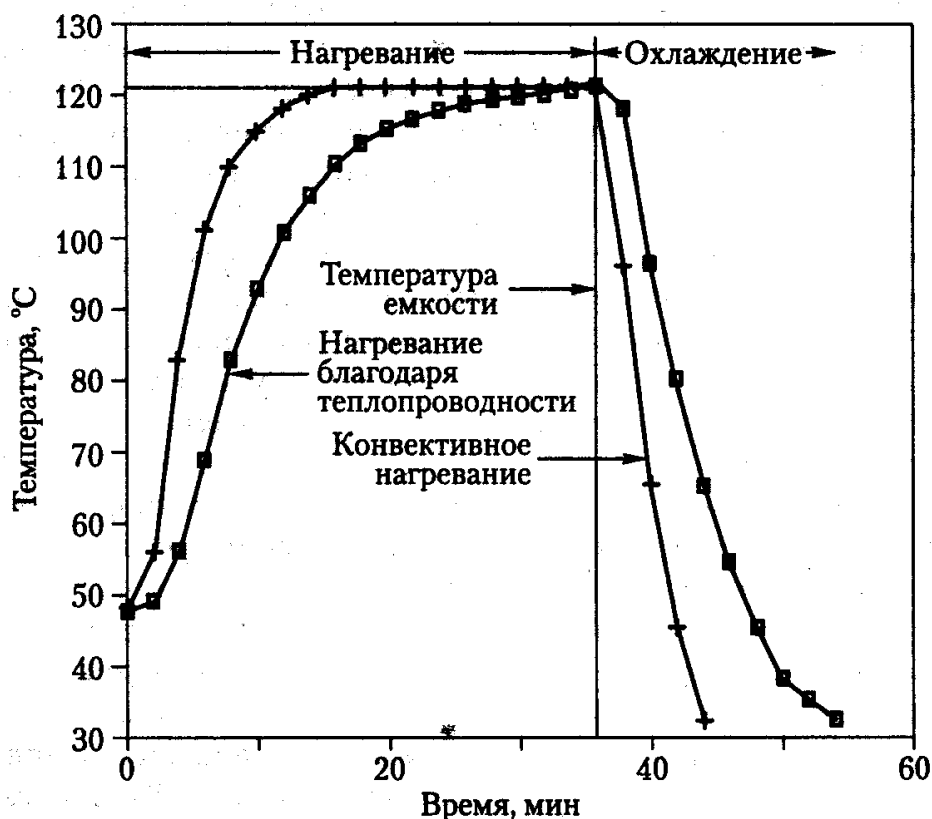


Рис. 2.6. Изменение теплопроницаемости пищевых продуктов с разными типами теплоотдачи



скорости нагревания  $f_h$  получают затем как время, требуемое для прохождения прямого участка кривой через один логарифмический цикл, а  $j_{ch}$  — как отношение  $(T_r - T_{pih})$  к  $(T_r - T_{ih})$ . При расчете термических процессов подобное построение графиков упрощают путем использования специальных графических процедур, позволяющих непосредственно строить графики температур, а не те графики разницы температур, о которых говорилось выше. Это достигается путем поворота полулогарифмической бумаги на  $180^\circ$  и расположения верхней линии «на один градус ниже температуры емкости», а затем непосредственного отражения температур на графике (эта процедура приводит к построению того же самого полулогарифмического графика, но как бы «перевернутого»).

Аналогичный график  $\log(T - T_w)$ , отражающий разницу температур между продуктом и температурой охлаждающей воды относительно времени охлаждения (рис. 2.8), используется для получения характеристик охлаждения. Для построения кривой охлаждения на графике используется полулогарифмическая бумага в нормальном положении, а нижняя линия устанавливается «на один градус выше температуры охлаждающей воды», после чего непосредственно строится график.

## 2.4.4 Параметры теплопроницаемости

Из кривых теплопроницаемости и условий нагревания для расчетов обычно получают следующие данные:

- $T_{ih}$  начальная температура пищевого продукта в начале нагревания  
 $T_{ic}$  температура пищевого продукта в начале охлаждения

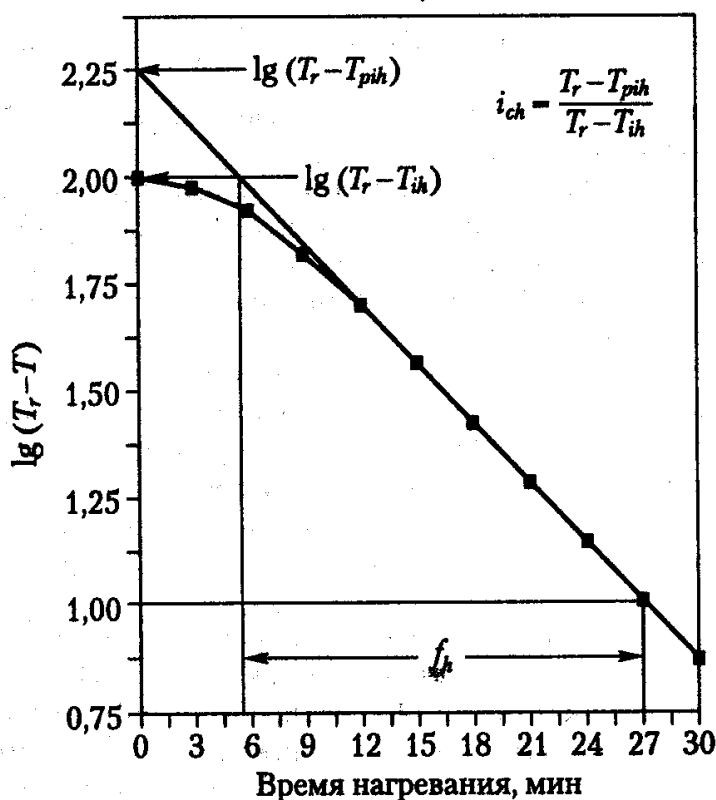


Рис. 2.7. Кривая нагревания и параметры нагревания



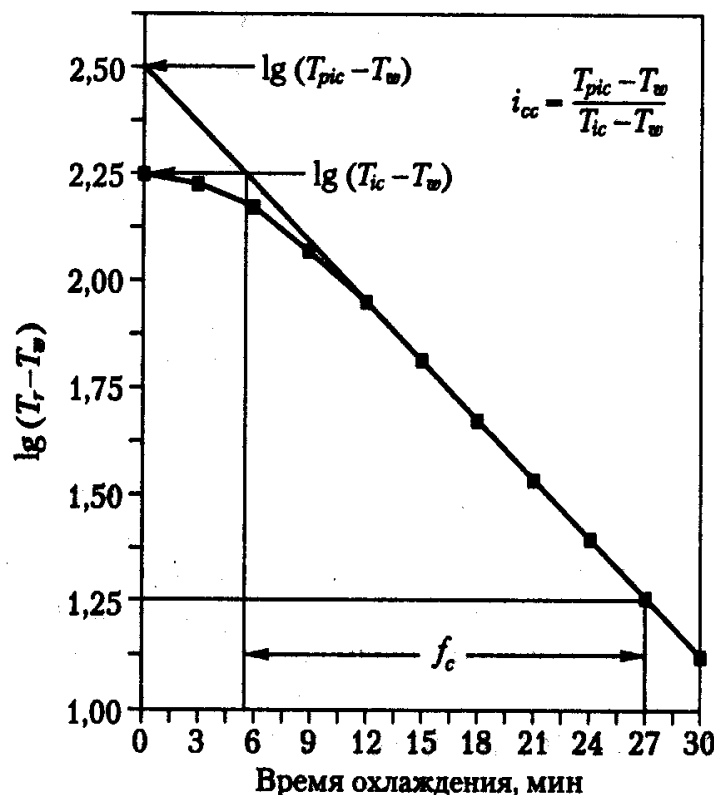


Рис. 2.8. Кривая охлаждения и параметры охлаждения

- $T_r$  температура емкости
- $T_w$  температура охлаждающей воды
- $I_h$  разница между температурами емкости и пищевого продукта в начале процесса нагрева ( $T_r - T_{ih}$ ).
- $I_c$  разница между температурами охлаждающей воды и пищевого продукта в начале процесса охлаждения ( $T_{ic} - T_w$ ).
- $g$  разница между температурами емкости и пищевого продукта  $T$  за время  $t$  ( $T_r - T$ ).
- $g_c$  значение  $g$  в конце нагревания или в начале охлаждения ( $T_r - T_{ic}$ ).
- $f_h$  показатель скорости нагрева; время, соответствующее прямому участку кривой нагрева (см. рис. 2.7) при прохождении одного логарифмического цикла; также отрицательное обратное значение падения кривой скорости нагревания.
- $f_c$  показатель скорости охлаждения; время, требуемое для прямолинейного участка кривой охлаждения (см. рис. 2.8) при прохождении одного логарифмического цикла; также отрицательное обратное значение уклона кривой скорости охлаждения.
- $l$  период подготовки; в порционных технологических процессах емкости требуется некоторое время для достижения условий технологического процесса; периодом подготовки называют время от начала подачи пара до достижения емкостью температуры  $T_r$ .
- 0,58  $l$  эффективное начало технологического процесса; период подготовки емкости меняется в зависимости от вида технологического процесса и от собственно емкости; в процедурах оценки технологического процесса примерно 42% такого периода подготовки обычно рассматривается как время достижения емкостью указанной температуры, так как температура продукта увеличивается и в этот период; чтобы к этому приспособиться, эффективное начало технологического процесса сдвигает-



	ся влево на расстояние 0,42 l от момента, когда емкость достигает $T_r$ , или вправо на 0,58 l от начала подачи пара.
$T_{pih}$	псевдона начальная температура в ходе нагревания; температура, получаемая в месте пересечения продолжения кривой нагревания и вертикальной линии, соответствующей эффективному началу технологического процесса 0,58 l.
$T_{pic}$	псевдона начальная температура в ходе охлаждения; температура, получаемая в месте пересечения продолжения кривой охлаждения и вертикальной линии, соответствующей началу охлаждения.
$j_{ch}$	коэффициент задержки скорости нагрева; коэффициент, который путем умножения на $I_h$ определяет место пересечения продолжения прямого участка полулогарифмической кривой нагрева и вертикальной линии, соответствующей эффективному началу технологического процесса $0,58 l = (T_r - T_{pih}) / (T_r - T_{ih})$ .
$j_{cc}$	коэффициент задержки скорости охлаждения; коэффициент, который путем умножения на $I_c$ определяет место пересечения продолжения прямого участка полулогарифмической кривой охлаждения и вертикальной линии, соответствующей началу процесса охлаждения $(T_w - T_{pic}) / (T_w - T_{ic})$ .
$B$	время процесса термообработки; корректировка Болла для периода подготовки (вход пара — выход пара минус 0,58 l).
$P_t$	время технологического процесса оператора; время после периода подготовки; $P_t = B - 0,42 l$ .

## 2.4.5 Время подготовки емкости

Автоклавы или реторты (емкости) после включения подачи пара достигают заданных рабочих температур не сразу. Для достижения этих температур требуется некоторое время, подлежащее вычислению. Время, требуемое для достижения установившейся заданной рабочей температуры после включения подачи пара, называют «периодом подготовки» (его обозначают по-разному —  $l$ ,  $CUT$  (*Come-Up Time*) или  $t_c$ ). При проведении проверки на теплопроницаемость и анализа получаемых данных период подготовки нагревательного оборудования является очень важным параметром, который необходимо регистрировать. Он используется впоследствии для установления нуля. Период подготовки всегда следует по возможности минимизировать. Тем не менее относительная величина  $CUT$  и  $f_h$  будет определять, значима ли  $f_h$ .

В технологических процессах, где в качестве теплоносителя используется вода, если  $CUT$  велико, а размер контейнера мал, не всегда можно добиться значимых величин  $f_h$  и  $j$ . Для того чтобы результаты теста на теплопроницаемость давали значимые величины  $f_h$  и  $j_{ch}$ , желательно, чтобы  $CUT$  составляло менее  $0,5f_h$ .

Целью проверки теплопроницаемости является получение данных относительно системы «продукт-контейнер», которые используются для проектирования процесса стерилизации. Мы в состоянии в значительной степени исключить воздействие  $CUT$  на значение  $f_h$  путем регистрации момента, когда автоклав или емкость достигает рабочей температуры, вычитая ее величину из значений температуры перед проведением линии  $f_h$ . Коррекция значения  $j_{ch}$  на эффект  $CUT$  более трудоемка и требует определения эффективности  $CUT$  или изменения нулевой точки процесса.

В работе [1] была проведена оценка воздействия периода подготовки емкости при конечной рабочей температуре. Было установлено, что 42% общего  $CUT$  можно рассматривать как время при рабочей температуре. Хотя такой подход и явля-





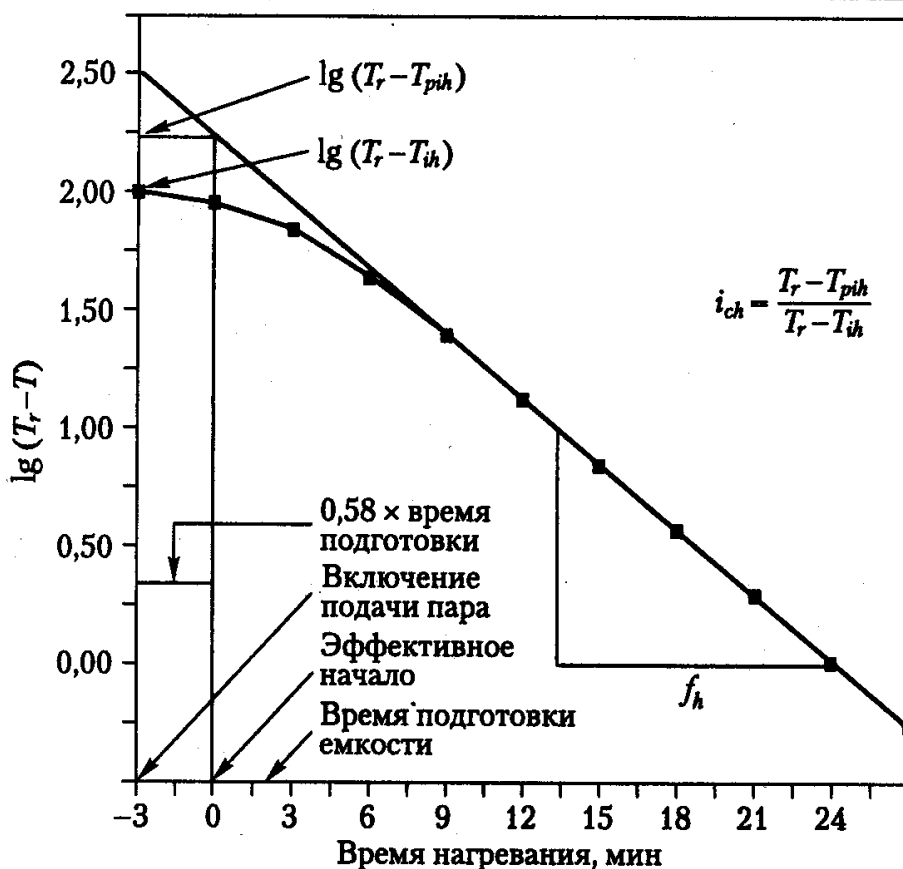


Рис. 2.9. Полулогарифмическая кривая нагрева, демонстрирующая коррекцию времени подготовки (*CUT*)

ется устаревшим, особенно при обработке тонких профильных контейнеров и контейнеров для продуктов быстрого питания, использование вышеуказанного подхода до сих пор является промышленным стандартом. На рис. 2.9 приведен пример, где  $t_c$  равно 5 мин, из которых только 2 мин (42%) емкость, как предполагается, работает при нормальной рабочей температуре в 121 °С.

Для идеальных условий истинное значение  $j$  системы «продукт–контейнер» возникает, когда при включении емкости мгновенно устанавливается рабочая температура. В нашем примере автоклав достигает рабочей температуры в 121 °С через 5 мин и остается при этой температуре в течение всего оставшегося технологического процесса. Коррекция *CUT* показывает, что 2 мин из этих 5 мин *CUT* можно рассматривать как время выдержки продукта при температуре теплоносителя. Средний результат является заменой первых 5 мин (в данном примере *CUT*) на  $0,42 t_c$ , что означает пренебрежение первыми  $0,58 t_c$ . Следовательно, в данном примере скорректированный нуль — это 2 мин до наступления момента, когда емкость достигает рабочей температуры, или 3 мин после включения подачи пара.

Значение  $T_r - T_{pih}$ , применяемое в расчетах значений  $j_h$ , является пересечением прямолинейной асимптоты с кривой нагрева (линия значений  $f_h$ ), продолженной до нулевого времени (или начала технологического процесса). В расчетах скорректированного значения  $j_h$  значение  $T_r - T_{pih}$  следует получать как пересечение ли-



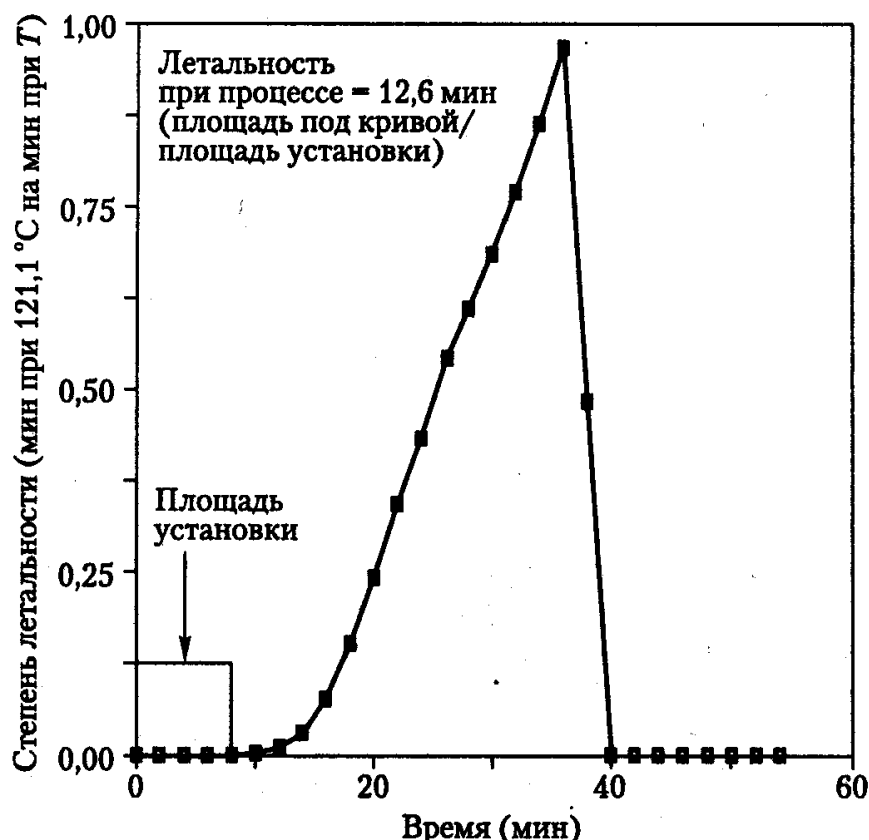


Рис. 2.10. Кривая зависимости летальности от времени для расчетов технологического процесса

нии скорректированного нуля (рис. 2.10). Как видно из рисунка, период подготовки CUT не влияет на значение  $f_h$  до тех пор, пока этот период относительно невелик.

## 2.5 Расчеты термических процессов

Целью расчетов термических процессов является достижение заданного набора параметров нагрева в необходимое для технологического процесса время, что дает установленную в процессе летальность, или оценка летальности данного процесса. Используемый метод должен точно учитывать летальные эффекты температурной реакции пищевого продукта, подвергающегося некоторому термическому процессу, относительно поведения микроорганизмов, представляющих опасность для здоровья человека или приводящих к порче продукта. Желательная степень летальности в терминах соответствующего времени при данной температуре  $F_0$  обычно заранее задается, а технологические процессы проектируются так, чтобы обеспечить минимальное значение этого установленного заранее значения в центре участка нагрева. Методы расчета подобных процессов делят на две обширные группы: а) методы общего характера и б) формульные методы. Методы общего характера включают в себя летальные эффекты, полученные графическими и численными интегрирующими методами. Эти процедуры основаны на данных относительно температуры и времени, которые получают на основе анализа пробных контейнеров с продуктом, обработан-



ных в обычных технологических условиях. В формульных методах используются параметры, полученные по данным теплопроницаемости, и некоторые математические процедуры для обобщения летальных эффектов.

## 2.5.1 Классический метод общего характера

Этот метод впервые был описан в работе [3], и в настоящее время представляет интерес лишь в историческом аспекте. Тем не менее именно он заложил основу для всех последующих методов расчета технологического процесса. Сам этот оригинальный метод представлял собой графическую процедуру обобщения летальных эффектов зависимости «время–температура», полученной на основе изучения обработки экспериментальных пищевых продуктов при типичных условиях. Несмотря на некоторые отличия от того, как этот метод применялся изначально, некоторые существенные моменты расчетной процедуры можно описать следующим образом. Необходимо а) кинетические данные (референтные значения ВТГ и значение  $z$ ) относительно целевого микроорганизма, б) репрезентативные данные относительно теплопроницаемости данного пищевого продукта и в) значение требуемой стерилизации для данного процесса (для расчета продолжительности технологического процесса) или продолжительность технологического процесса (для расчета значения стерилизации). Последнее представляет собой меру силы термообработки. Бигелоу определил обратное значение ВТГ как показатель летальности для соответствующей температуры. Продукт с показателем летальности и соответствующим временем нагрева дает достигнутое значение стерилизации. Значение стерилизации, равное единице, показывает, что указанное время нагрева эквивалентно ВТГ при данной температуре. Значения этого показателя выше единицы свидетельствуют об избыточной силе (избыточной гибели микроорганизмов), а значения меньше единицы говорят о недостаточной термообработке. Данный классический метод основан на графическом обобщении показателей летальности для температурного профиля данного пищевого продукта в течение всего времени нагрева, необходимого для достижения установленного значения стерилизации. Для получения целевого значения стерилизации время термообработки по необходимости увеличивают или уменьшают. Процедура расчета проиллюстрирована в нижеприведенном примере.

Этап 1. Кинетические данные по целевому микроорганизму

Пример: ВТГ при 121 °C равно 2,52 мин при значении  $z$  в 10 °C

ВТГ при любой другой температуре получается из

$$[ВТГ_T] = [ВТГ_{121,1}] 10^{(121,1-T)/10} \quad (2.30)$$

Этап 2. Данные о зависимости «время–температура» для данного пищевого продукта сведены в столбцы 1 и 2 табл. 2.1

Столбец 1. Время нагрева.

Столбец 2. Температура.

Столбец 3. Обратное значение величины, полученной по каждой температуре по столбцу 2 с использованием уравнения 2.30.

Этап 3. Расчет значения стерилизации

В классическом методе кривая показателя летальности вычерчивается путем нанесения показателей летальности, соответствующих тому или иному времени нагрева, и площадь под дан-

ной кривой интегрирует летальный эффект при всех температурах в течение нагревания и охлаждения. Значение стерилизации по используемой для этой кривой шкале будет эквивалентно площади, получаемой в результате умножения показателя летальности на время, равное единице. Площадь под данной кривой относительно площади единицы стерилизации будет составлять значение стерилизации для данного технологического процесса. Значение стерилизации, равное единице, — это минимальное требование относительно данного микроорганизма. Если результирующее значение стерилизации больше или меньше единицы, кривая охлаждения вручную изгибается влево или вправо, и процедура повторяется для получения нового значения стерилизации. Весь такой процесс повторяют до тех пор, пока не будет получено желаемое значение стерилизации, и отмечается соответствующее время технологического процесса. Подобная процедура подробно описана в следующем разделе, касающемся «улучшенного классического метода».

**Таблица 2.1. Расчет технологического процесса с помощью классического и улучшенного классического методов**

Время, мин	Температура, °C	ВТГ, мин	$\text{ВТГ}^{-1}, \text{мин}^{-1}$	Значение $L$
0	48	>1000	0,000	0,00
2	49	>1000	0,000	0,00
4	56	>1000	0,000	0,00
6	69	>1000	0,000	0,00
8	83	>1000	0,000	0,00
10	93	>1000	0,000	0,00
12	101	258	0,004	0,01
14	106	81,6	0,012	0,03
16	110	32,5	0,031	0,08
18	113	16,3	0,061	0,15
20	115	10,3	0,097	0,25
22	116,5	7,27	0,138	0,35
24	117,5	5,77	0,173	0,44
26	118,5	4,59	0,218	0,55
28	119,0	4,09	0,245	0,62
30	119,5	3,64	0,275	0,69
32	120	3,25	0,308	0,78
34	120,5	2,89	0,346	0,87
36	121,0	2,58	0,388	0,98
38	118	5,15	0,194	0,49
40	96	815	0,001	0,00
42	80	>1000	0,000	0,00
44	65	>1000	0,000	0,00
46	54	>1000	0,000	0,00
48	45	>1000	0,000	0,00
50	38	>1000	0,000	0,00
52	35	>1000	0,000	0,00
54	32	>1000	0,000	0,00
Классический метод (значение стерилизации) $(1/\text{ВТГ}) \Delta t$			4,89	
Улучшенный классический метод $(F_0, \text{мин}) \sum (\text{значение } L) \Delta t$				12,6

Графическое решение довольно трудоемко, и поэтому оно претерпело ряд модификаций. Получить аналогичную информацию можно с помощью способа численного интегрирования (см. [12]). Если используются одинаковые временные интервалы, как в данном примере (табл. 2.1), то показатели летальности в столбце 3 могут быть суммированы  $\sum VT\Gamma^{-1}$  и умножены на временной интервал  $\Delta t$ , что дает значение стерилизации для данного процесса  $\sum VT\Gamma^{-1} \times \Delta t$ . Если же временные интервалы не одинаковы, то вышеприведенное произведение можно получить для конца каждого временного интервала и просуммировать их позднее  $\sum VT\Gamma^{-1} \Delta t$ . Из этого примера видно, что значение стерилизации 4,89. Это означает, что данный режим термообработки примерно в пять раз сильнее, чем требуется для уничтожения целевого микроорганизма. Следовательно, имеется возможность сократить время технологического процесса.

## 2.5.2 Улучшенный классический метод

При улучшенном классическом методе используется графическое решение, предложенное в работе [1]. Здесь основное улучшение — построение описанной выше кривой гипотетического термического разрушения, параллельной кривой термического сопротивления испытуемых микроорганизмов (то есть с тем же значением показателя температурной чувствительности  $z$ ). Значение  $F$  принимается равным 1 мин при  $121,1^\circ\text{C}$  ( $250^\circ\text{F}$ ). Это позволяет проводить сравнение различных процессов по достигаемой летальности. Применяв кривую термического разрушения так, как было показано выше, показатель летальности  $L$  при любой температуре может быть получен как

$$L = 10^{(t-121,1)/z}, \quad (2.31)$$

где  $t$  — температура в  $^\circ\text{C}$ .

Нанесение на график значений  $L$  относительно времени (см. рис. 2.10) так, как было показано в примере применения классического метода, даст кривую, площадь под которой представляет эквивалент времени (в мин) при  $121,1^\circ\text{C}$  ( $F_0$ ). Площадь под кривой может быть измерена при помощи планиметра путем «нарезки», «взвешивания» и подсчета квадратиков или путем аппроксимации к стандартным геометрическим формам (треугольникам, квадратам и т. п.). В нашем примере площадь под кривой равна  $12,6 \text{ см}^2$ . Каждый квадратный сантиметр на графике представляет эквивалент значения  $F_0$  при 1 мин ( $1 \text{ см}^2$  на этой кривой показывает произведение показателя летальности и времени в 1 мин; например, на единицу площади: произведение показателя летальности  $0,125 \cdot 8 \text{ мин} = 1,0 \text{ мин}$ ). Следовательно, площадь под кривой  $12,6 \text{ см}^2$  будет соответствовать значению  $F_0$  в 12,6 мин. Как уже говорилось выше, графическое решение довольно трудоемко. В работе [12] для вычисления летальности был применен метод численного интегрирования путем умножения степени летальности на временной интервал и суммирования значений летальности, что позволяет аккумулировать летальность в течение всего процесса нагревания и охлаждения (12,6 мин, как показано в табл. 2.1)

$$F_0 = \int_0^t L dt \quad (2.32)$$

или

$$F_0 = \sum_0^t L \Delta t. \quad (2.33)$$

Для получения времени технологического процесса, соответствующего данному  $F_0$ , необходимо действовать методом проб и ошибок. Обычно практикуются испытательные тесты термообработки при различных значениях времени технологического процесса. Результаты нескольких таких тестов представляются на графике так, как показано на рис. 2.11, и определяются достигнутые значения  $F_0$  для каждого из технологических процессов. Нанесением на график площадей под кривыми или полученных значений  $F_0$  относительно времени технологического процесса (рис. 2.12) можно получить время процесса, требуемое для достижения необходимой летальности. Например, чтобы получить требуемое  $F_0$  в 10 мин, время технологического процесса составит около 33,5 мин.

Классический метод расчета технологического процесса является наиболее точным способом определения значения стерилизации при нагреве. В этом методе используются фактические данные по времени и температуре, а анализ производится с использованием выбранного значения  $z$ . Результирующее значение  $F_0$  — истинное значение для конкретных использованных данных. Метод измерений, будь то графический или численный, вручную, с помощью калькулятора или компьютера, дает сходные результаты. Классический метод применяется в качестве базового для расчета необходимых значений  $F_0$  при оценке пригодности формульных методов. Результаты классического метода во многом зависят от поведения конкретного пищевого продукта в используемых для проверки условиях. Здесь следует избегать обобщений и экстраполяций или применять их очень осторожно.

### 2.5.3 Метод Болла

Формульный метод Болла (Ball) — наиболее простой и широко распространенный способ проведения расчетов технологического процесса. После его первой публикации в 1921 г. были разработаны и другие формульные методы анализа процессов, связанных с нагреванием. Метод Болла характеризуется тем, что

- он применим для определения времени технологического процесса, если известна конечная летальность  $F_0$ ;
- он применим для расчета реальной летальности для данного технологического процесса;
- с его помощью можно непосредственно рассчитывать новые технологические процессы для данного пищевого продукта в таре разного размера при помощи доступных процедур преобразования параметров (поскольку используются данные о теплопроницаемости в параметрической форме (значения  $f_h$  и  $j$ ));
- новые технологические процессы могут быть непосредственно рассчитаны при изменении температуры теплоносителя  $T_r$  или начальной температуры продукта  $T_i$ .

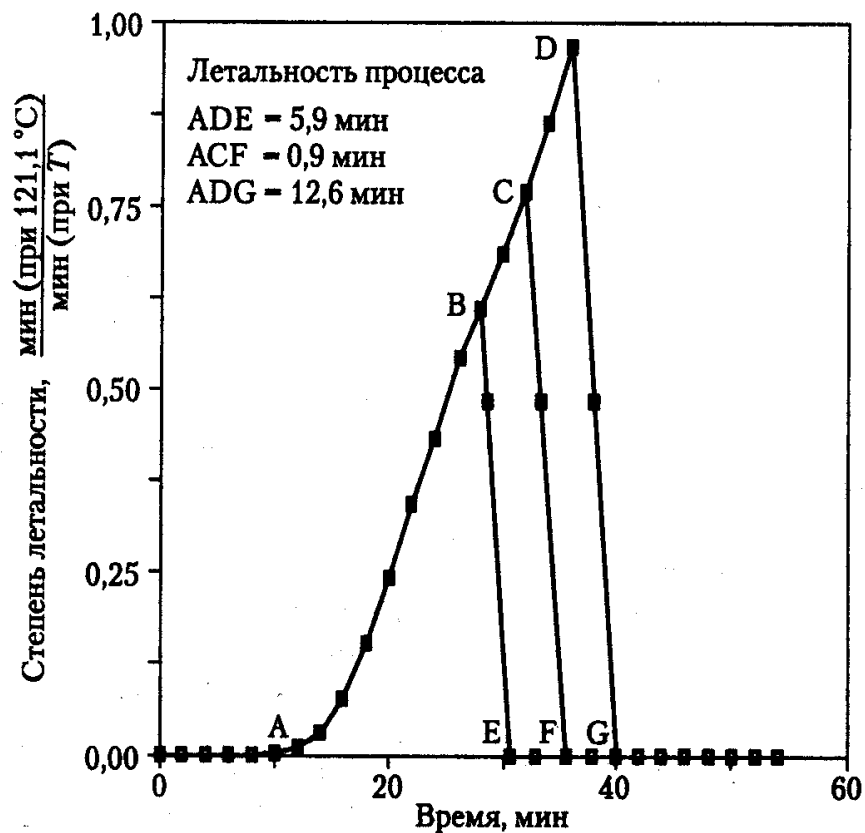


Рис. 2.11. Зависимость степени летальности от времени нескольких технологических процессов

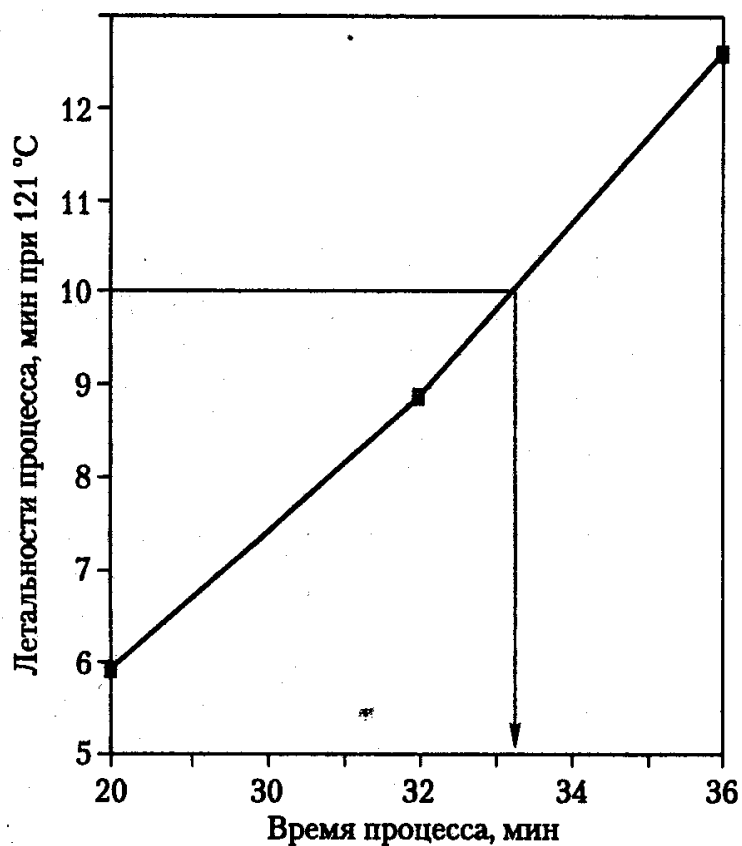


Рис. 2.12. Зависимость летальности процесса от времени

Использование формульных методов существенно ускоряет расчет процессов и является очень полезным при изучении влияния отдельных параметров технологического процесса.

Метод Болла основан на уравнении, полученном из кривой теплопроницаемости (обозначения те же, что и выше):

$$B = f_h \log(j_{ch} I_h / g_c), \quad (2.34)$$

где  $B$  — время технологического процесса;  $f_h$  — показатель скорости нагревания;  $j_{ch}$  — коэффициент задержки (лаг-фактор);  $I_h$  — начальная разница температур ( $T_r - T_i$ );  $g_c$  — разница температур в конце тепловой обработки ( $T_r - T$  при  $t = B$ );  $T_r$  — температура емкости;  $T_{pih}$  — псевдона начальная температура продукта;  $T_i$  — начальная температура продукта.

В работе [1] был использован тот факт, что значение стерилизации на участке нагрева при термическом процессе является функцией уклона кривой нагревания  $f_h$  и разницы между конечной температурой продукта и температурой теплоносителя в конце периода нагревания ( $T_r - T$ ). Для обозначения этой разницы температур Болл использовал символ  $g$ .

На основе понятия о референциальной кривой ВТГ получают ВТГ или значение  $F$  при температуре емкости (Болл обозначал ее как  $U$ ) как продукт с требуемым для процесса показателем летальности ( $F_0$ ), и  $F_r$ , представляющее собой число минут при температуре емкости, эквивалентное 1 мин при 250 °F (все температуры, приведенные ниже в описании формульных методов расчета, даны в °F; °F = 9/5(t °C + 32); °C = 5/9(t °F - 32).

$$U = F_0 F_i \quad (2.35)$$

и

$$F_i = 10^{(250 - T_r) / z} \quad (2.36)$$

Еще один фактор, влияющий на летальность в процессе охлаждения, — движущая сила для охлаждения. По мнению Болла, данные по теплопроницаемости характеризуются при нагревании начальным гиперболическим лагом, прямой логарифмической линией, гиперболическим лагом при охлаждении и логарифмической прямой при охлаждении.

После проверки многочисленных профилей нагрева (соотношений «температура–время») Болл сделал вывод, что коэффициент лага (задержки) при охлаждении можно аппроксимировать по среднему значению  $j_{cc}$ , равному 1,41. Взаимосвязь между  $f_h/U$  и  $g$  Болл представил как в виде таблицы, так и виде графика. При выводе этих зависимостей он предположил, что значение  $f$  кривой нагревания равно значению  $f$  кривой охлаждения ( $f_h = f_c$ ) и что значением стерилизации при температурах выше 80 °F и ниже температуры теплоносителя можно пренебречь. Болл также обнаружил, что с данным значением  $f_h/U$  ассоциируются значение  $g$  для единственного значения  $z$  и единственное значение  $T_r - T_w$  (180 °C). Позднее было выявлено, что среднее изменение  $T_r - T_w$  в 10 °F может привести к изменению в 1% рассчитанной летальности [22].



Формульный метод Болла быстро стал стандартным для промышленности. Хотя в работе [11] сообщалось о некоторых его неточностях, он до сих пор широко распространен на предприятиях пищевой промышленности. Одним из главных ограничений в его применении является использование постоянного коэффициента лага охлаждения  $j_{cc}$  (1,41). Для вычисления времени технологического процесса, требуемого для достижения нужного показателя летальности микроорганизмов ( $F_0$ ) и наоборот, процедура расчета заставляет использовать экспериментально полученные параметры теплопроницаемости ( $f_h$  и  $j_{ch}$ ) и условий производства ( $T_r$  и  $T_i$ ), а также таблицы и графики. В *American Can Company* были разработаны более подробные таблицы, расширившие те, которые изначально были опубликованы Боллом (эти подробные таблицы приведены в работе [10]).

В статье [24] данные из таблиц Болла были параметризованы так, что с помощью программируемого калькулятора или компьютера можно получить  $R$  в терминах  $g$  или  $\lg g$ . В результате уравнения выглядят следующим образом:

- Для расчета  $f_h/U$ :

$$x = \lg g.$$

Если  $x \leq -0,9452$ , то  $f_h/U = 1/(0,71 - x)$ .

$$\begin{aligned} \text{Если } x > -0,9452, \text{ то } \lg f_h/U = & 0,072465 x^5 + 0,06064 x^4 + \\ & + 0,071368 x^3 + 0,23426 x^2 + 0,51548 x + 0,12384. \end{aligned} \quad (2.37)$$

- Для расчета  $\lg g$

$$R = \lg f_h/U.$$

Если  $f_h/U \leq 0,6$ , то  $\lg g = (0,71 f_h/U - 1)/(f_h/U)$ .

$$\begin{aligned} \text{Если } f_h/U > 0,6, \text{ то } \lg g = & 0,042808 R^5 - 0,35709 R^4 + 1,1929 R^3 - \\ & - 2,1296 R^2 + 2,4847 R - 0,28274. \end{aligned} \quad (2.38)$$

Репрезентативные значения  $\lg g$  для метода Болла приведены в табл. 2.2.

### 2.5.3.1 Корректировка времени подогрева и продолжительности технологического процесса по Боллу

Продолжительность технологического процесса  $t_p$  («время оператора») — это период времени с того момента, как емкость (автоклав) достигает необходимой температуры, до момента выключения подачи пара. Как мы уже отмечали, в автоклавах необходимая температура не достигается мгновенно после включения подачи пара; для достижения рабочей температуры требуется некоторое время подогрева ( $CUT$  или  $t_c$ ). Мы также уже говорили, что эффективность такого периода подогрева составляет 42%, и, следовательно, это значение следует включать в продолжительность технологического процесса. Такая скорректированная продолжительность процесса или продолжительность процесса по Боллу ( $t_B$ ) включает в себя эффективную составляющую времени подогрева и может быть записана как

$$t_B = t_p + 0,42 t_c. \quad (2.39)$$

Понятие корректировки времени подогрева используется лишь в формульных методах, поскольку при классических эффективностях продолжительности времени

Таблица 2.2.  $f_h/U$  относительно значений  $\lg g$  для формульного метода Болла

$f_h/U$	$\log g$	$f_h/U$	$\log g$
0,350	-2,147	4,000	0,655
0,400	-1,790	4,500	0,702
0,450	-1,512	5,000	0,742
0,500	-1,290	5,500	0,776
0,550	-1,108	6,000	0,805
0,600	-0,949	7,000	0,854
0,650	-0,843	8,000	0,894
0,700	-0,736	9,000	0,927
0,750	-0,635	10,00	0,955
0,800	-0,544	15,00	1,052
0,850	-0,463	20,00	1,112
0,900	-0,392	25,00	1,155
0,950	-0,328	30,00	1,187
1,000	-0,273	35,00	1,214
1,100	-0,173	40,00	1,235
1,200	-0,090	45,00	1,254
1,300	-0,019	50,00	1,270
1,400	0,042	60,00	1,296
1,500	0,097	70,00	1,318
1,600	0,146	80,00	1,336
1,700	0,183	90,00	1,352
1,800	0,229	100,0	1,365
1,900	0,265	120,0	1,388
2,000	0,298	140,0	1,406
2,500	0,430	160,0	1,422
3,000	0,525	180,0	1,435
3,500	0,598	200,0	1,447

подогрева автоматически включается в рассчитываемую летальность, так как все используемые в расчетах температуры отражают воздействие теплового потока на продукт в период подогрева. При расчете продолжительности технологического процесса для получения желаемого  $F_0$  по методу Болла результатом вычислений будет  $t_B$ . Если рассчитанные значения  $t_B$  использовать как рекомендуемую продолжительность технологического процесса  $t_p$ , влияние времени подогрева останется не учтенным, и действительное значение  $F_0$  для данного продукта будет больше, чем было определено изначально. При такой процедуре время подогрева предполагается равным нулю, и на предприятиях это — обычная практика. Пренебрежение периодом подогрева делает технологический процесс безопаснее, но вместе с тем приводит к избыточным затратам средств, энергии, потерям пищевых свойств продукта и ухудшению его качества.

При использовании формульных методов для расчета летальности (значений  $F_0$ ), если в расчетах вместо  $t_B$  используется  $t_p$ , рассчитанное значение будет более низ-

Таблица 2.3. Расчет продолжительности технологического процесса с помощью метода Болла

1.	$j_{ch}$	2,0
2.	$f_h$	56 мин
3.	Летальность в ходе технологического процесса $F_0$	6 мин
4.	Температура емкости $T_r$	248 °F
5.	Начальная температура $T_i$	80 °F
6.	$I_h = T_r - T_i$	168 °F
7.	$j_{ch} \cdot I_h$	336
8.	$\lg(j_{ch} \cdot I_h)$	2,526
9.	$z =$	18 °F
10.	$F_i = 10^{(250 - T_r)/z}$	1,282
11.	Интерполяция значения $\lg g$ по табл. 2.2	0,863
12.	$B = f_h [\lg(j_{ch} \cdot I_h) - \lg g]$	93,1 мин

Таблица 2.4. Расчет летальности технологического процесса с помощью метода Болла

1.	$j_{ch}$	1,64
2.	$f_h$	30 мин
3.	Продолжительность технологического процесса $F_0$	49 мин
4.	Температура емкости $T_r$	260 °F
5.	Начальная температура $T_i$	100 °F
6.	$I_h = T_r - T_i$	160 °F
7.	$j_{ch} \cdot I_h$	262,4
8.	$\lg(j_{ch} \cdot I_h)$	2,42
9.	$z =$	18 °F
10.	$F_i = 10^{(250 - T_r)/z}$	0,28
11.	$B/f_h$	1,63
12.	$\lg(g) = \lg(j_{ch} \cdot I_h) - B/f_h$	0,79
13.	Интерполяция значения $f_h/U$ по табл. 2.2	5,7
14.	$F_0 = f_h / [(f_h/U) F_i]$	18,8 мин

ким. При расчетах значений  $F_0$  для нерегулярных или дискуссионных процессов обычно используют  $t_B$  (для учета более высокого достигнутого значения  $F_0$ ). Примеры использования метода Болла для расчета технологического процесса приведены в табл. 2.3 и 2.4.

## 2.5.4 Метод Стумбо

В работе [23] опубликовано несколько таблиц для оценки технологического процесса с учетом различных значений  $j_{cc}$ . Метод Стумбо по существу сходен с методом Болла, но несколько более гибок при расчетах термических эффектов охлаждения в

тех случаях, когда коэффициент задержки при охлаждении (лаг-фактор) отличен от 1,41 (как это предполагается у Болла). Эти оригинальные таблицы были получены вручную путем параметрических измерений начерченных температурных графиков, наложенных на данные по степени летальности с дальнейшей интерполяцией этих графиков. Затем эти таблицы были несколько переработаны (см. [16, 22]) путем компьютерной интеграции термических «историй», полученных путем моделирования уравнений теплопереноса методом конечных разностей. Как сообщается, эти таблицы лучше соответствуют результатам, получаемым с помощью классических методов расчета, чем те, что получаются с применением метода Болла [19]. Типичные примеры значений  $z$  при 10 °F (для вегетативных микроорганизмов; пастеризационные процессы), при 18 °F (для *C. Botulinum*; стерилизационные процессы) и 40 °F (для питательных веществ) приведены в табл. 2.5–2.7. В табл. 2.8 дается расчет продолжительности времени технологического процесса для данной летальности, а в табл. 2.9 — то же, но для расчета летальности при данном технологическом процессе по методу Стамбо.

## 2.5.5 Метод Фама

В работе [14] приведены две системы простых алгебраических уравнений и упрощенные таблицы для расчета процессов термообработки — одна для  $U/f_h > 1$ , а вторая — для  $U/f_h < 1$ . По мнению Фама, данный метод обеспечивает получение данных, не уступающих по точности методу Стамбо, однако он более удобен, так как вместо 57 таблиц (у Стамбо) используется лишь одна. Этот метод также может использоваться для расчета средней летальности. В последнее время автор усовершенствовал свои уравнения так, что они стали охватывать и ситуации, когда продолжительность нагревания и охлаждения различны, то есть  $f_h$  не равно  $f_c$  [15]. Как сообщается, точность модифицированных формул не хуже, чем авторы ранее сообщали применительно к ситуациям, когда  $f_h = f_c$ . Уравнения Фама и процедуры расчета сведены в табл. 2.10 и 2.11. Они полезны при компьютеризованных расчетах технологического процесса и дают результаты с точностью, не уступающей методу Стамбо [14].

Важно заметить, что о формульном методе расчетов относительно самого разного оборудования, о процедурах расчета и условиях производства существует обширная литература, особенно касающаяся лагов нагрева и охлаждения [1, 2, 4, 6–9, 11, 20–22, 24].

Формульные методы широко применяются для расчетов технологического процесса благодаря их удобству. Классический метод более точен, поскольку относительно природы кривых охлаждения и нагревания не делается никаких допущений. Используются непосредственно экспериментальные данные, преобразуются в степень летальности и интегрируются относительно времени. Главным недостатком классического метода является то, что время технологического процесса специфично лишь для данного набора производственных условий. Математические методы более гибки, так как здесь нет необходимости экспериментально получать данные по теплопроницаемости для тех или иных условий производства. Одной из частных проблем математического метода является тот факт, что применять его не так легко, особенно когда продукт характеризуется нелинейными кривыми нагрева.

Таблица 2.5. Соотношения  $f_h/U$  при  $z = 10^\circ\text{F}$ 

$f_h/U$	Значения $g$ , если $j$ кривой охлаждения равно								
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00
0,20	2,68-05	2,78-05	2,88-05	2,98-05	3,07-05	3,17-05	3,27-05	3,36-05	3,46-05
0,30	8,40-04	9,39-04	1,04-03	1,14-03	1,24-03	1,34-03	1,43-03	1,53-03	1,63-03
0,40	5,84-03	6,51-03	7,18-03	7,85-03	8,53-03	9,20-03	9,87-03	1,05-02	1,12-02
0,50	2,01-02	2,21-02	2,40-02	2,60-02	2,79-02	2,99-02	3,18-02	3,38-02	3,57-02
0,60	4,73-02	5,11-02	5,49-02	5,87-02	6,25-02	6,63-02	7,01-02	7,39-02	7,77-02
0,70	8,85-02	9,44-02	1,01-01	1,06-01	1,12-01	1,18-01	1,24-01	1,30-01	1,36-01
0,80	0,143	0,151	0,159	0,167	0,175	0,183	0,191	0,199	0,207
0,90	0,208	0,218	0,228	0,238	0,248	0,258	0,268	0,278	0,288
1,00	0,282	0,294	0,305	0,317	0,329	0,340	0,352	0,364	0,376
2,00	1,14	1,17	1,19	1,21	1,24	1,26	1,29	1,31	1,33
3,00	1,83	1,88	1,92	1,97	2,01	2,05	2,10	2,14	2,19
4,00	2,33	2,41	2,48	2,55	2,63	2,70	2,77	2,85	2,92
5,00	2,71	2,81	2,92	3,03	3,14	3,24	3,35	3,46	3,57
6,00	3,01	3,15	3,29	3,43	3,57	3,72	3,86	4,00	4,14
7,00	3,25	3,43	3,61	3,78	3,96	4,13	4,31	4,49	4,66
8,00	3,47	3,68	3,89	4,10	4,30	4,51	4,72	4,93	5,14
9,00	3,67	3,90	4,14	4,38	4,62	4,85	5,09	5,33	5,57
10,00	3,84	4,11	4,38	4,64	4,91	5,17	5,44	5,70	5,97
15,00	4,60	4,97	5,35	5,72	6,09	6,47	6,84	7,21	7,59
20,00	5,22	5,67	6,12	6,57	7,01	7,46	7,91	8,35	8,80
25,00	5,78	6,27	6,77	7,27	7,77	8,27	8,76	9,26	9,76
30,00	6,27	6,81	7,34	7,88	8,41	8,95	9,48	10,02	10,55
35,00	6,72	7,29	7,85	8,41	8,98	9,54	10,10	10,67	11,23
40,00	7,14	7,72	8,31	8,89	9,48	10,06	10,65	11,23	11,82
45,00	7,52	8,12	8,72	9,33	9,93	10,53	11,13	11,73	12,33
50,00	7,87	8,49	9,10	9,72	10,34	10,95	11,57	12,18	12,80
60,00	8,51	9,15	9,78	10,42	11,06	11,69	12,33	12,97	13,60
70,00	9,07	9,72	10,37	11,02	11,68	12,33	12,98	13,63	14,28
80,00	9,56	10,23	10,89	11,55	12,22	12,88	13,55	14,21	14,88
90,00	10,0	10,7	11,4	12,0	12,7	13,4	14,1	14,7	15,4
100,00	10,4	11,1	11,8	12,5	13,1	13,8	14,5	15,2	15,9
150,00	11,9	12,6	13,4	14,1	14,8	15,5	16,3	17,0	17,7
200,00	13,0	13,7	14,5	15,2	16,0	16,8	17,5	18,3	19,0
250,00	13,7	14,5	15,3	16,1	16,9	17,7	18,5	19,3	20,1
300,00	14,3	15,2	16,0	16,8	17,7	18,5	19,3	20,1	21,0
350,00	14,8	15,7	16,5	17,4	18,3	19,1	20,0	20,9	21,7
400,00	15,2	16,1	17,0	17,9	18,8	19,7	20,6	21,5	22,4
450,00	15,5	16,5	17,4	18,3	19,3	20,2	21,1	22,1	23,0
500,00	15,8	16,8	17,8	18,7	19,7	20,6	21,6	22,6	23,5
600,00	16,3	17,4	18,4	19,4	20,4	21,4	22,4	23,4	24,5
700,00	16,8	17,8	18,9	19,9	21,0	22,1	23,1	24,2	25,3
800,00	17,1	18,2	19,3	20,4	21,5	22,6	23,7	24,8	25,9
900,00	17,4	18,5	19,7	20,8	22,0	23,1	24,3	25,4	26,6
999,99	17,7	18,8	20,0	21,2	22,4	23,6	24,7	25,9	27,1

Таблица 2.6. Соотношения  $f_h/U$  при  $z = 18^\circ\text{F}$ 

$f_h/U$	Значения $g$ , если $j$ кривой охлаждения равно								
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00
0,20	4,09-05	4,42-05	4,76-05	5,09-05	5,43-05	5,76-05	6,10-05	6,44-05	6,77-05
0,30	2,01-03	2,14-03	2,27-03	2,40-03	2,53-03	2,66-03	2,79-03	2,93-03	3,06-03
0,40	1,33-02	1,43-02	1,52-02	1,62-02	1,71-02	1,80-02	1,90-02	1,99-02	2,09-02
0,50	4,11-02	4,42-02	4,74-02	5,06-02	5,38-02	5,70-02	6,02-02	6,34-02	6,65-02
0,60	8,70-02	9,43-02	1,02-01	1,09-01	1,16-01	1,23-01	1,31-01	1,38-01	1,45-01
0,70	0,150	0,163	0,176	0,189	0,202	0,215	0,228	0,241	0,255
0,80	0,226	0,246	0,267	0,287	0,308	0,328	0,349	0,369	0,390
0,90	0,313	0,342	0,371	0,400	0,429	0,458	0,487	0,516	0,545
1,00	0,408	0,447	0,485	0,523	0,561	0,600	0,638	0,676	0,715
2,00	1,53	1,66	1,80	1,93	2,07	2,21	2,34	2,48	2,61
3,00	2,63	2,84	3,05	3,26	3,47	3,68	3,89	4,10	4,31
4,00	3,61	3,87	4,14	4,41	4,68	4,94	5,21	5,48	5,75
5,00	4,44	4,76	5,08	5,40	5,71	6,03	6,35	6,67	6,99
6,00	5,15	5,52	5,88	6,25	6,61	6,98	7,34	7,71	8,07
7,00	5,77	6,18	6,59	7,00	7,41	7,82	8,23	8,64	9,05
8,00	6,29	6,75	7,20	7,66	8,11	8,56	9,02	9,47	9,93
9,00	6,76	7,26	7,75	8,25	8,74	9,24	9,74	10,23	10,73
10,00	7,17	7,71	8,24	8,78	9,32	9,86	10,39	10,93	11,47
15,00	8,73	9,44	10,16	10,88	11,59	12,31	13,02	13,74	14,45
20,00	9,83	10,69	11,55	12,40	13,26	14,11	14,97	15,82	16,68
25,00	10,07	11,7	12,7	13,6	14,6	15,6	16,5	17,5	18,4
30,00	11,5	12,5	13,6	14,6	15,7	16,8	17,8	18,9	19,9
35,00	12,1	13,3	14,4	15,5	16,7	17,8	18,9	20,0	21,2
40,00	12,8	13,9	15,1	16,3	17,5	18,7	19,9	21,1	22,3
45,00	13,3	14,6	15,8	17,0	18,3	19,5	20,8	22,0	23,2
50,00	13,8	15,1	16,4	17,7	19,0	20,3	21,6	22,8	24,1
60,00	14,8	16,1	17,5	18,9	20,2	21,6	22,9	24,3	25,7
70,00	15,6	17,0	18,4	19,9	21,3	22,7	24,1	25,6	27,0
80,00	16,3	17,8	19,3	20,8	22,2	23,7	25,2	26,7	28,1
90,00	17,0	18,5	20,1	21,6	23,1	24,6	26,1	27,6	29,2
100,00	17,6	19,2	20,8	22,3	23,9	25,4	27,0	28,5	30,1
150,00	20,1	21,8	23,5	25,2	26,8	28,5	30,2	31,9	33,6
200,00	21,7	23,5	25,3	27,1	28,9	30,7	32,5	34,3	36,2
250,00	22,9	24,8	26,7	28,6	30,5	32,4	34,3	36,2	38,1
300,00	23,8	25,8	27,8	29,8	31,8	33,7	35,7	37,7	39,7
350,00	24,5	26,6	28,6	30,7	32,8	34,9	37,0	39,0	41,1
400,00	25,1	27,2	29,4	31,5	33,7	35,9	38,0	40,2	42,3
450,00	25,6	27,8	30,0	32,3	34,5	36,7	38,9	41,2	43,4
500,00	26,0	28,3	30,6	32,9	35,2	37,5	39,8	42,1	44,4
600,00	26,8	29,2	31,6	34,0	36,4	38,8	41,2	43,6	46,0
700,00	27,5	30,0	32,5	35,0	37,5	39,9	42,4	44,9	47,4
800,00	28,1	30,7	33,3	35,8	38,4	40,9	43,5	46,0	48,6
900,00	28,7	31,3	34,0	36,6	39,2	41,8	44,4	47,0	49,7
999,99	29,3	31,9	34,6	37,3	39,9	42,6	45,3	47,9	50,6

Таблица 2.7. Соотношения  $f_h/U$  при  $z = 40^\circ\text{F}$ 

$f_h/U$	Значения $g$ , если $j$ кривой охлаждения равно								
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00
0,20	8,58-05	9,64-05	1,07-04	1,18-04	1,28-04	1,39-04	1,49-04	1,60-04	1,70-04
0,30	3,98-03	4,47-03	4,96-03	5,46-03	5,95-03	6,44-03	6,93-03	7,43-03	7,92-03
0,40	2,72-02	3,06-02	3,39-02	3,73-02	4,07-02	4,40-02	4,74-02	5,08-02	5,42-02
0,50	8,67-02	9,72-02	1,01-01	1,18-01	1,29-01	1,39-01	1,50-01	1,61-01	1,71-01
0,60	0,188	0,211	0,234	0,256	0,279	0,302	0,324	0,347	0,370
0,70	0,329	0,368	0,408	0,447	0,487	0,527	0,566	0,606	0,645
0,80	0,501	0,562	0,622	0,682	0,743	0,803	0,864	0,924	0,984
0,90	0,698	0,782	0,867	0,952	1,036	1,121	1,205	1,290	1,374
1,00	0,912	1,023	1,135	1,246	1,357	1,469	1,580	1,691	1,802
2,00	3,30	3,72	4,13	4,55	4,96	5,38	5,79	6,21	6,62
3,00	5,46	6,15	6,84	7,53	8,22	8,91	9,60	10,29	10,98
4,00	7,25	8,18	9,11	10,04	10,97	11,90	12,83	13,77	14,70
5,00	8,75	9,89	11,04	12,18	13,32	14,46	15,61	16,75	17,89
6,00	10,1	11,4	12,7	14,0	15,4	16,7	18,0	19,3	20,7
7,00	11,2	12,7	14,2	15,7	17,1	18,6	20,1	21,6	23,1
8,00	12,2	13,8	15,5	17,1	18,7	20,4	22,0	23,6	25,2
9,00	13,1	14,9	16,6	18,4	20,2	21,9	23,7	25,4	27,2
10,00	14,0	15,8	17,7	19,6	21,5	23,3	25,2	27,1	29,0
15,00	17,3	19,6	22,0	24,3	26,7	29,0	31,4	33,8	36,1
20,00	19,8	22,5	25,2	27,8	30,5	33,2	35,9	38,6	41,3
25,00	21,8	24,8	27,7	30,6	33,6	36,5	39,4	42,4	45,3
30,00	23,5	26,6	29,8	32,9	36,1	39,2	42,4	45,6	48,7
35,00	24,9	28,3	31,6	34,9	38,2	41,5	44,9	48,2	51,5

По [22], с. 271.

Таблица 2.8. Расчет продолжительности технологического процесса по методу Стамбо

1.	$j_{ch}$	1,3
2.	$f_h$	12,0 мин
3.	Летальность в ходе технологического процесса $F_0$	10 мин
4.	Температура емкости $T_r$	255 °F
5.	Начальная температура $T_i$	150 °F
6.	$I_h = T_r - T_i$	105 °F
7.	$j_{ch} \cdot I_h$	136,5
8.	$\lg(j_{ch} \cdot I_h)$	2,14
9.	$z =$	18 °F
10.	$F_i = 10^{(250 - T_r)/z}$	0,53
11.	$f_h/U = f_h/(F_0 \times F_i)$	2,27
12.	$j_{cc}$	1,6
Из табл. 2.6 для $z = 18$ °F ( $j_{cc} = 1,6$ ) значение $g$ получается путем интерполяции		
	$f_h/U$	значение $g$
	2,0	2,34
	3,0	3,89
Интерполяция дает		
	2,27	2,76
13.	$B = f_h [\lg(j_{ch} \cdot I_h/g)]$	20,3 мин

Таблица 2.9. Расчет летальности в ходе технологического процесса по методу Стамбо

1.	$j_{ch}$	2,05
2.	$f_h$	34,9 мин
3.	Продолжительность технологического процесса	69,0 мин
4.	Температура емкости, $T_r$	245 °F
5.	Начальная температура, $T_i$	150 °F
6.	$I_h = T_r - T_i$	95 °F
7.	$j_{ch} \cdot I_h$	194,8
8.	$\lg(j_{ch} \cdot I_h)$	2,29
9.	$z =$	18 °F
10.	$F_i = 10^{(250 - T_r)/z}$	1,90
11.	$B/f_h$	1,98
12.	$\lg(g) = \lg(j_{ch} \cdot I_h) - B/f_h$	0,31
13.	$g$	2,05
14.	$j_{cc}$	1,8
Из табл. 2.6 для $z = 18$ °F ( $j_{cc} = 1,8$ ) значение $g$ получается путем интерполяции		
	$f_h/U$	значение $g$
	1,0	0,586
	2,0	2,15
Интерполяция дает		
	1,94	2,05
15.	$F_0 = f_h/[(f_h/U) F_i]$	9,50 мин



Таблица 2.10. Метод Фама. Основные уравнения и коэффициенты

Для высоких значений стерилизации:  $W > 1$

$$\lg(g/z) = -W + A_j - B/j + C$$

$$A = 0,088 + 0,107 N_2$$

$$B = 0,102 N_1$$

$$C = 0,074 N_1 + 0,177 N_2 - 0,653$$

$$W = U/f_h$$

$$N_1 = z/(T_r - T_i)$$

$$N_2 = z/(T_r - T_w)$$

Для низких значений стерилизации:  $0,04 < W < 1,5$

$$\lg(a) = -W + A_1 + A_2 \exp(-2,7 W^{0,5})$$

$$\lg(b) = -W + B_1 + B_2 \exp(-2,7 W^{0,5})$$

$$g = z(a + b j_{cc})$$

$$W = U/f_h$$

$$A_1 = -0,71 - (N_1/N_2) \exp(-0,58 N_2)$$

$$A_2 = 2,14(N_2)^2 + 0,6(N_2)^2/N_1 - 0,26(N_1)^2 - 1,24 N_1 + 1,02$$

$$B_1 = 0,31(N_2/N_1)^{0,5} + 0,55(N_2)^{0,5} + 0,61(N_1)^{0,5} - 1,86$$

$$B_2 = (N_2/N_1)^{0,5} (0,91(N_1)^2 - 3,18 N_1 - 0,755) - 1,38 (N_1)^2 + 2,55 N_1 + 1,52$$

Таблица 2.11. Пример применения метода Фама

Шаги 1–10 аналогичны методу Стумбо (см. табл. 2.9)

11.  $f_h/U = 2,27$

12.  $W = U/f_h = 0,44$

$$W < 1,5$$

$$\lg(a) = -W + A_1 + A_2 \exp(-2,7 W^{0,5})$$

$$\lg(b) = -W + B_1 + B_2 \exp(-2,7 W^{0,5})$$

$$g = z(a + b j_{cc})$$

$$W = 0,44$$

$$A_1 = -0,71, \quad B_1 = -1,20$$

$$A_2 = 0,85, \quad B_2 = 0,98$$

$$a = 0,098, \quad \lg(b) = 0,032$$

$$g = 2,76$$

13.  $B = f_h[\lg(j_{ch} I_h/g)] = 20,5 \text{ мин}$

# Литература

1. Ball, C. O. Thermal process time for canned food. — Bull. 37, Vol. 7, Part 1. — Washington, D. C.: Nat. Res. Council 1923.
2. Ball, C. O. and Olson F. C. W. Sterilization in Food Technology, NY: McGraw-Hill, 1957.
3. Bigelow, W. D., Bohart, G. S., Richardson, A. C., and Ball, C. O. Heat penetration in processing canned foods // Nat. Canners Assoc. Bull. — 1920. — № 16L.
4. Cleland, A. C. and Robertson, G. L. Determination of thermal processes to ensure commercial sterility of food in cans // Developments in Food Preservation. — Vol. 3 / Throne, S. (ed.). — NY: Elsevier Applied Science, 1985.
5. Fellows, P. Food Processing Technology: Principles and Practices. — Chichester, England: Ellis Horwood, 1988.
6. Hayakawa, K.-I. Experimental formulas for accurate estimation of transient temperature of food and their application to thermal process evaluation // Food Technol. — 1970. — № 24(12). — P. 89.
7. Hayakawa, K.-I. A critical review of mathematical procedures for determining proper heat sterilization processes // Food Technol. — 1978. — № 32(3). — P. 59.
8. Larkin, J. W. Use of a modified Ball's formula method to evaluate aseptic processing of liquid foods containing particulates // Food Technol. — 1989. — № 43(3). — P. 124–131.
9. Larkin, J. W. and Berry, R. B. Estimating cooling process lethality for different cooling j values // J. Food Sci. — 1991. — № 56(4). — P. 1063–1067.
10. Lopez, A. A Complete Course in Canning and Related Processes. — 12th ed. — Baltimore, MD: The Canning Trade, 1987.
11. Merson, R. L., Singh, R. P., and Carroad, P. A. An evaluation of Ball's formula method of thermal process calculations // Food Technol. — 1978. — № 32(3). — P. 66.
12. Patashnik, M. A simplified procedure for thermal process evaluation // Food Technol. — 1953. — № 7(1). — P. 1.
13. Pflug, I. J. Textbook for an Introductory Course in the Microbiology and Engineering of Sterilization Process. — Minneapolis, MN: Environmental Sterilization Laboratory. — 1987.
14. Pham, Q. T. Calculation of thermal process lethality for conduction-heated canned foods // J. Food Sci. — 1987. — № 52(4). — P. 967.
15. Pham, Q. T. Lethality calculation for thermal processes with different heating and cooling rates // Int. J. Food Sci. Technol. — 1990. — № 25. — P. 148.
16. Purohit, K. S. and Stumbo, C. R. Computer calculated parameters for thermal process evaluations, Unpublished data; cited in Stumbo, C. R. Thermobacteriology in Food Processing. — 2nd ed. — NY: Academic Press. — 1972.
17. Ramaswamy, H. S., van de Voort, F. R., and Ghazala, S. An analysis of TDT and Arrhenius methods for handling process and kinetic data // J. Food Sci. — 1989. — № 54. — P. 1322.
18. Richardson, P. S. and Holdsworth, S. D. Mathematical modeling and control of sterilization processes // Process Engineering in the Food Industry / Field, R. W. and Howell, J. A. (eds.). — NY: Elsevier Applied Science, 1989. — P. 169.
19. Smith, T. and Tung, M. A. Comparison of formula methods for calculating thermal process lethality // J. Food Sci. — 1982. — № 47. — P. 626.
20. Steele, R. J. and Board, P. W. Thermal process calculations using sterilizing ratios // J. Food Technol. — 1979. — № 14. — P. 227.
21. Steele, R. J., Board, P. W., Best, D. J., and Willcox, M. E. Revision of the formula method tables for thermal process evaluation // J. Food Sci. — 1979. — № 44. — P. 954.
22. Stumbo, C. R. Thermobacteriology in Food Processing. — 2nd ed. — NY: Academic Press. — 1973.

23. Stumbo, C. R. and Longley, R. E. New parameters for process calculation // Food Technol. — 1966. — № 20(3). — P. 341.
24. Vinters, J. E., Patel, R. H., and Halaby, G. A. Thermal process evaluation by programmable calculator // Food Technol. — 1975. — № 29(3). — P. 42.

## **Дополнительная отечественная литература**

Лыков В. А. Теория теплопроводности. — М.: Высш. шк., 1967.

# 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ЗАМОРАЖИВАНИЯ И РАСЧЕТ МОРОЗИЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*Дональд Дж. Клилэнд и Кеннет Дж. Валентас*

*Перевод Е. Богдановой под науч. ред. канд. техн. наук, доцента Ю. Д. Румянцева*

## Содержание

- 3.1 Введение
  - 3.1.1 Качество продукта и скорость замораживания
  - 3.1.2 Требования к расчету морозильных аппаратов
  - 3.1.3 Рекомендации по использованию морозильных аппаратов
- 3.2 Виды морозильных устройств
  - 3.2.1 Замораживание в потоке воздуха
    - 3.2.1.1 *Морозильные устройства с естественным движением воздуха*
    - 3.2.1.2 *Морозильные камеры и туннели с интенсивным движением воздуха*
    - 3.2.1.3 *Конвейерные морозильные аппараты*
    - 3.2.1.4 *Спиральные конвейерные морозильные аппараты*
    - 3.2.1.5 *Флюидизационные морозильные аппараты*
  - 3.2.2 Плиточные морозильные аппараты
  - 3.2.3 Погружные морозильные аппараты
  - 3.2.4 Криогенные морозильные аппараты
- 3.3 Математическое описание процесса замораживания
  - 3.3.1 Физика замораживания пищевых продуктов
  - 3.3.2 Математические модели
- 3.4 Определение времени замораживания
  - 3.4.1 Численные методы
  - 3.4.2 Аналитические методы
    - 3.4.2.1 *Формула Планка*
    - 3.4.2.2 *Рекомендуемый метод*
  - 3.4.3 Половинная толщина
  - 3.4.4 Коэффициент формы
    - 3.4.4.1 *Расчет коэффициента формы*
    - 3.4.4.2 *Экспериментальное определение коэффициента формы*
- 3.5 Теплофизические свойства
  - 3.5.1 Данные справочной литературы
  - 3.5.2 Экспериментальные данные
  - 3.5.3 Расчетные данные
    - 3.5.3.1 *Концептуальная модель*

- 3.5.3.2 *Воздушные прослойки в упаковке и пористость продуктов*
- 3.5.3.3 *Понижение температуры замерзания, доля вымороженной воды и связанная вода*
- 3.4.3.4 *Плотность*
- 3.5.3.5 *Удельная теплоемкость*
- 3.5.3.6 *Энтальпия и скрытая теплота*
- 3.5.3.7 *Теплопроводность*
- 3.5.3.8 *Теплофизические свойства отдельных компонентов пищевых продуктов*
- 3.5.4 Упрощенный метод расчета теплофизических свойств
- 3.6 Коэффициенты теплопередачи
  - 3.6.1 Замораживание в плиточном морозильном аппарате
  - 3.6.2 Замораживание в воздушном аппарате
  - 3.6.3 Замораживание погружением в жидкость и криогенное замораживание
  - 3.6.4 Упаковка и воздушные зазоры
- 3.7 Тепловые нагрузки
  - 3.7.1 Продукт
  - 3.7.2 Вентиляторы и насосы
  - 3.7.3 Теплоприток через изоляцию и инфильтрация воздуха
  - 3.7.4 Оттаивание
  - 3.7.5 Подготовительный период
  - 3.7.6 Пиковые тепловые нагрузки
  - 3.7.7 Уменьшение тепловой нагрузки
- 3.8 Экономические аспекты
  - 3.8.1 Капитальные затраты
    - 3.8.1.1 *Холодопроизводительность и тип холодильной установки*
    - 3.8.1.2 *Испарители и вентиляторы*
    - 3.8.1.3 *Компрессоры, конденсаторы и другое оборудование*
  - 3.8.2 Эксплуатационные затраты
    - 3.8.2.1 *Потребление энергии*
    - 3.8.2.2 *Расход криогенного вещества*
    - 3.8.2.3 *Потеря массы продукта вследствие испарения*
- 3.9 Примеры расчетов
  - 3.9.1 Пример 1: Определение коэффициента формы  $E$  для ограниченного цилиндра
  - 3.9.2 Пример 2: Определение теплофизических свойств рыбного филе в картонной коробке
  - 3.9.3 Пример 3: Расчет коэффициента теплопередачи при замораживании блоков рыбного филе в морозильном аппарате с интенсивной циркуляцией воздуха
  - 3.9.4 Пример 4: Расчет времени замораживания пищи
  - 3.9.5 Пример 5: Влияние упаковки на продолжительность замораживания
  - 3.9.6 Пример 6: Определение продолжительности замораживания пористых пищевых продуктов
  - 3.9.7 Пример 7: Сравнение воздушного и плиточного морозильных аппаратов
    - 3.9.7.1 *Воздушный морозильный аппарат*
    - 3.9.7.2 *Плиточный морозильный аппарат*
    - 3.9.7.3 *Сравнение вариантов*
  - 3.9.8 Пример 8: Влияние скорости движения воздуха на продолжительность замораживания и энергопотребление
  - 3.9.9 Пример 9: Влияние изменения производительности аппарата на его характеристики
  - 3.9.10 Пример 10: Сравнение криогенного и воздушного морозильных аппаратов
    - 3.9.10.1 *Криогенный морозильный аппарат*
    - 3.9.10.2 *Воздушный морозильный аппарат*
    - 3.9.10.3 *Сравнительный анализ морозильных аппаратов*

Глоссарий

Список обозначений

Литература



## 3.1 Введение

Оптимизация морозильных аппаратов предполагает достижение компромисса между капитальными и эксплуатационными затратами. Отвечающие оптимальным требованиям морозильные аппараты должны замораживать определенную массу продуктов требуемого качества при минимальных потере массы и сумме общих затрат (капитальных плюс эксплуатационных).

### 3.1.1 Качество продукта и скорость замораживания

Принято считать, что качество связано со скоростью замораживания, так как последняя влияет на распределение кристаллов льда в продукте, на размеры кристаллов льда и, следовательно, на потерю массы продуктом. К сожалению, качество трудно выразить количественно. Определить взаимосвязь между скоростью замораживания и качеством продуктов достаточно сложно, поскольку каждый продукт имеет свои особенности [44]. С учетом того, что размеры данного продукта и тип его упаковки, как правило, диктуются рынком, скорость замораживания в основном зависит от выбора того или иного вида морозильного аппарата.

Для большинства пищевых продуктов при достаточно высокой скорости замораживания требования, предъявляемые к качеству продукта, по сравнению с вопросами затрат уходят на второй план. Исключение обычно составляют дорогие и легко повреждаемые при замораживании продукты. Многие преимущества ускоренного замораживания могут теряться в процессе хранения [15], поэтому следует критически подходить к выбору скорости замораживания. Важно, чтобы в аппарате достигалось полное замораживание продукта, так как скорость снижения температуры при хранении будет значительно ниже, что может привести как к существенному ухудшению качества продукта, так и к увеличению общих затрат.

### 3.1.2 Требования к расчету морозильных аппаратов

Начальная стадия проектирования морозильных аппаратов включает следующие этапы:

- определение размеров продукта, его формы, типа упаковки, производительности технологической линии и температуры хранения;
- выбор вида морозильного аппарата и уровня его автоматизации, необходимой скорости замораживания продукта для сохранения его качества и увязки с предшествующими и последующими технологическими операциями;
- тепловой расчет морозильного аппарата и холодильной установки.

Тепловой расчет морозильного аппарата и холодильной установки включает:

- определение размеров морозильного аппарата и продолжительности нахождения в нем данного продукта;
- определение режима работы, в частности, требуемой подачи воздуха и температурного режима, необходимого для достижения полного замораживания продукта в морозильной камере;



- расчет и подбор вентилятора, испарителя, компрессора и других компонентов холодильной установки; оценка эксплуатационных затрат (например, потребления электроэнергии и потери массы продукта).

На завершающем этапе выполняется конструкторская разработка проекта. Все проектные решения необходимо обосновывать экономически.

Конечно, проектированием морозильных аппаратов занимаются только инженеры-проектировщики, но некоторые вопросы проектирования должен знать каждый инженер, работающий в пищевой промышленности, — например, владеть методами расчета продолжительности замораживания продуктов, процесса замораживания продуктов и тепловой нагрузки на холодильную установку.

### 3.1.3 Рекомендации по использованию морозильных аппаратов

После выполнения расчетов необходимо рассмотреть условия эксплуатации установок на конкретном предприятии. Эксплуатация в условиях производства осложняется тем, что морозильный аппарат не всегда будет работать с расчетной производительностью или другими проектными характеристиками, и поэтому должен быть рассчитан на работу в изменяющихся условиях. Их изменение влияет как на эксплуатационные затраты, так и на производительность, и поэтому необходимо знать методы количественной оценки этого влияния.

Ниже мы рассмотрим: виды морозильных аппаратов, применяемых в пищевой промышленности; расчет параметров охлаждения и замораживания пищевых продуктов; методы оценки продолжительности их замораживания; методы определения теплофизических свойств и коэффициентов теплопередачи; методы расчета тепловой нагрузки, характеристики и конструкцию отдельных компонентов холодильной установки, а также экономические вопросы, включающие расчет капитальных и эксплуатационных затрат. Будут рассмотрены также примеры расчетов.

## 3.2 Виды морозильных устройств

Морозильные устройства (устройства для замораживания пищевых продуктов) можно разделить на две большие группы:

- с использованием воздуха как среды, непосредственно воспринимающей теплоту от продукта;
- с использованием других охлаждающих средств.

Морозильные устройства первой группы делятся на камеры (или туннели), конвейерные аппараты (с ленточным или спиральным конвейером) и флюидизационные (с псевдоожиженным слоем замораживаемого продукта).

К морозильным устройствам второй группы относятся аппараты: плиточные (с охлаждающими плитами), погружные (с охлаждающей жидкостью, в которую погружают замораживаемый продукт), криогенные (с охлаждающей криогенной жидкостью), а также аппараты для замораживания жидких продуктов.

Основные виды морозильных устройств приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1. Сравнительные характеристики морозильных устройств

Характеристика	Камера	Туннель	Конвейерный	Спиральный	Флюидизационные	Плиточный	Погружной	Криогенный
Капитальные затраты	L	I	I	I	I/H	H	L	L
Энергия вентиляции/насоса	L	I/H	I/H	I/H	I/H	L	L	L
Общие эксплуатационные расходы	L/I	I	I	I	I	L	L/I	H
Скорость замораживания	L	L/I	I	I/H	I	H	H	H
Потеря веса неупакованного продукта	H	I/H	I	L/H	I	L	L	L
Относительные размеры производственного помещения	H	I/H	I	L	L/I	L	L	L
Размеры продукта	A	A	L/I	L	L/I	I/H	L/I	L/I
Форма продукта	A	A	U	U	A	R	A	A
Типы продукта	A	A	FV, P, FH	FV, P	A	M, FH, P	M, C, PY, FH, P	A

Обозначения: L — низкое, малое; I — среднее, промежуточное; H — большое, высокое; A — все; U — единое; R — прямоугольное; M — мясные продукты; P — обработанное, подготовленное; FH — рыба; FV — фрукты и овощи; PY — птица; C — консервированное в банках.

### 3.2.1 Замораживание в потоке воздуха

Наиболее распространены морозильные аппараты, в которых продукт замораживается с помощью воздуха (воздушные морозильные аппараты). Штучные продукты размещают в охлаждаемом объеме так, чтобы они обдувались циркулирующим потоком воздуха. Циркуляция воздуха обеспечивается вентиляторами, которые обычно конструктивно объединены со змеевиками испарителей, образуя теплообменный аппарат, называемый воздухоохладителем. Такие морозильные аппараты достаточно просты и работают циклами (замораживание чередуется с подготовкой к нему) с загрузкой и разгрузкой замораживаемого продукта вручную (рис. 3.1, 3.2), но существуют и более сложные модели воздушных морозильных аппаратов, работающие непрерывно (рис. 3.3–3.5). Их используют для замораживания большого объема продуктов приблизительно одинакового размера в течение длительного времени.

В воздушных морозильных аппаратах применяют различные схемы движения воздуха и замораживаемого продукта. Обычно используют горизонтальную подачу воздуха на продукт (рис. 3.1), но в ряде случаев применяют вертикальную, чтобы





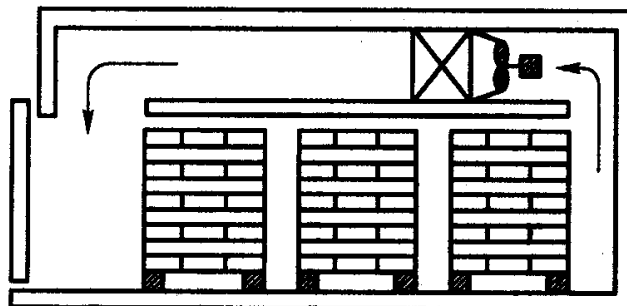


Рис. 3.1. Схема туннеля периодического действия

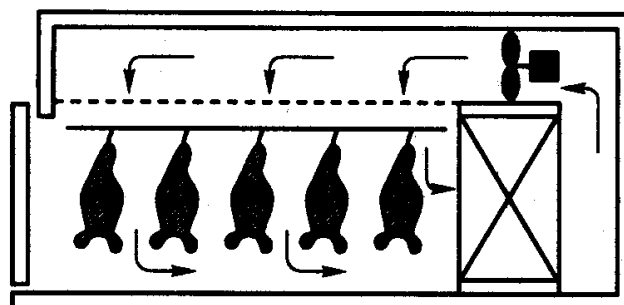


Рис. 3.2. Схема туннеля ( морозильной камеры) для замораживания полутуш мяса периодического действия

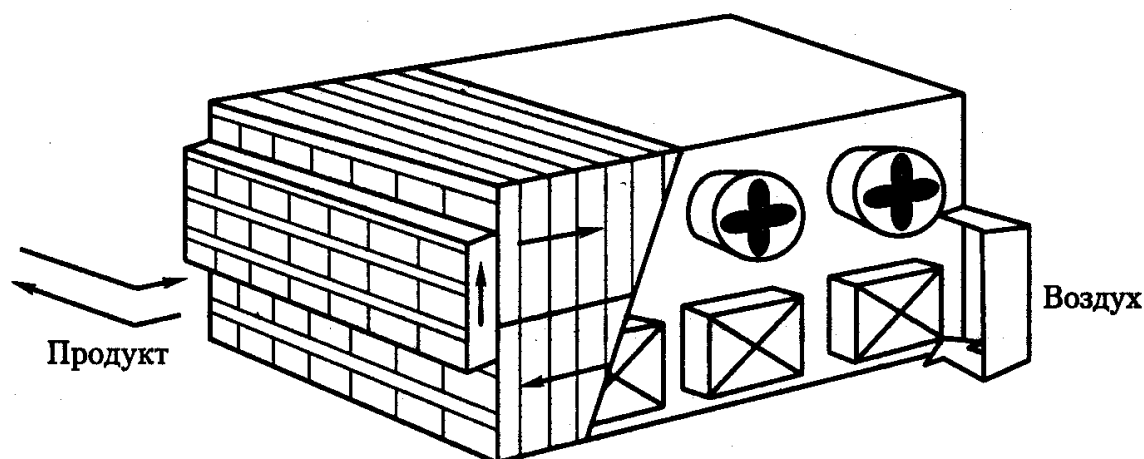


Рис. 3.3. Схема конвейерного морозильного аппарата для замораживания блочного продукта непрерывного действия

создать одинаковые условия для обдува продукта (рис. 3.2, 3.5). В системах непрерывного действия потоки воздуха и направление перемещения продуктов могут быть параллельными, встречными (см. рис. 3.5) или перекрестными (рис. 3.3, 3.4). Две последние конфигурации чаще применяются в тех случаях, когда нагрев охлаждающего воздуха должен быть минимальным. Способ размещения продукта и его подачи относительно воздушного потока зависит от их размера, формы и упаковки. Могут использоваться поддоны (лотки), люльки, тележки, крюки, конвейеры и т. п.

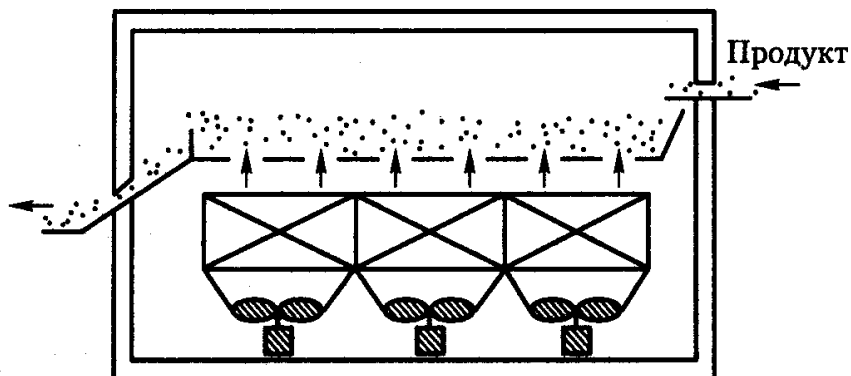


Рис. 3.4. Схема флюидизационного морозильного аппарата непрерывного действия

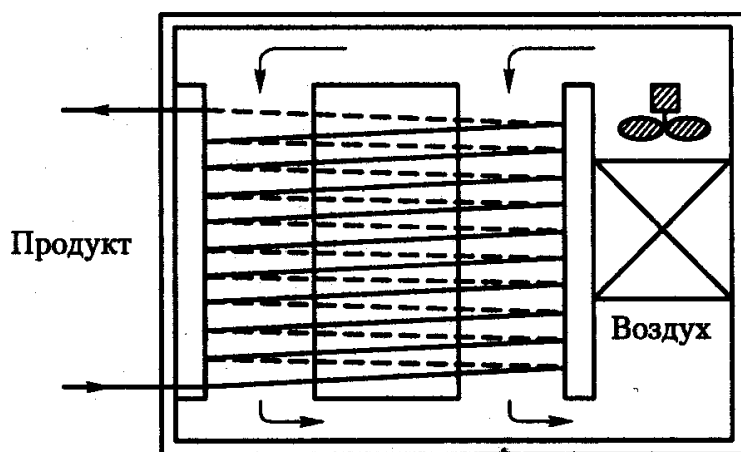


Рис. 3.5. Схема спирального конвейерного морозильного аппарата непрерывного действия

В воздушных морозильных аппаратах можно замораживать продукты различного типа, размера, формы и в разнообразной упаковке.

Основные достоинства таких аппаратов заключаются в их простоте и гибкости, а также в том, что воздух — естественная для продуктов среда. Их недостатком является необходимость использования мощных вентиляторов, поскольку воздух имеет небольшую теплоемкость. Кроме того воздух поглощает влагу, испаряющуюся с поверхности продукта, что приводит к существенной потере массы замораживаемых неупакованных продуктов; также возможна деформация упакованных продуктов. Требуется периодически принимать меры, предотвращающие образование инея на змеевиках испарителя или проводить оттаивание испарителя, что прерывает работу морозильного аппарата.

### 3.2.1.1 Морозильные устройства с естественным движением воздуха

Этот вид морозильного устройства (морозильная камера) представляет собой теплоизолированное охлаждаемое помещение, оборудованное охлаждающими батареями (испарителями без вентиляторов) и средствами для хранения и транспортирования замораживаемого продукта. Морозильные камеры обычно используют для замора-

живания продуктов крупных размеров, когда интенсивность замораживания ограничивается толщиной продукта.

Продукт подвешивают или укладывают в виде штабеля на полу или полках стеллажа, которые могут непосредственно охлаждаться. Воздух циркулирует над продуктом с минимальной скоростью. К достоинствам морозильных камер с естественным движением воздуха относятся: универсальность; простота конструкции; небольшая интенсивность испарения влаги с поверхности; относительно небольшое потребление энергии. Вместе с тем следует отметить и ряд недостатков: скорость замораживания минимальна, присутствует нежелательная неоднородность поля температур по объему камеры, требуются значительные затраты ручного труда.

### *3.2.1.2 Морозильные камеры и туннели с интенсивным движением воздуха*

Морозильные камеры и туннели обычно используют для замораживания продуктов крупного и среднего размеров любой формы. Продукт размещают на полках тележек или подвешивают таким образом, чтобы он равномерно обдувался воздухом. В туннельных морозильных аппаратах непрерывного действия обычно предусматривают конвейерную систему, обеспечивающую перемещение продукта по туннелю, автоматическую его загрузку и разгрузку (см. рис. 3.1 и 3.2). В туннельном морозильном аппарате воздух подается только в охлаждаемый объем, в котором движется продукт. В результате относительно простыми средствами обеспечивается равномерное по объему поле скоростей движения воздуха, что позволяет уменьшить объемную подачу воздуха и расход энергии на привод вентилятора. Для удобства размещения продуктов на лотках и равномерного распределения воздушного потока загрузка большинства туннельных морозильных аппаратов непрерывного действия ограничивается продуктами одинакового размера и формы, однако если в этом туннеле использовать лотки разных размеров, то возможно одновременное замораживание продуктов разных размеров.

В морозильной камере с интенсивным движением воздуха проще обеспечить равномерное распределение воздушного потока в объеме, где находится замораживаемый продукт.

### *3.2.1.3 Конвейерные морозильные аппараты*

В конвейерных морозильных аппаратах продукты укладывают непосредственно на ленту конвейера или в металлические формы и они перемещаются в охлаждаемом объеме с помощью конвейеров различного типа: цепного, лоткового, ленточного и др., непрерывно или циклически.

Наиболее широко распространены аппараты с непрерывно движущимся конвейером (ленточным, цепным и др.), так как они позволяют замораживать продукты различной формы, в упаковке и без нее, непрерывно и в автоматическом режиме. Скорость движения непрерывно работающего конвейера регулируется в зависимости от вида и размера продукта.

Имеются морозильные аппараты с несколькими конвейерами, расположенными друг над другом. Продукт поступает на верхний конвейер, затем переводится на расположенный ниже конвейер, движущийся в обратном направлении, и т. д. Достоинствами таких конвейерных аппаратов являются: гибкость в работе, компактность, высокий уровень автоматизации.

### 3.2.1.4 Спиральные конвейерные морозильные аппараты

Спиральные аппараты — это разновидность конвейерных морозильных аппаратов, в которых непрерывная длинная конвейерная лента располагается по спирали ярусами (до 50 ярусов в высоту) (рис. 3.5). Сетчатая лента с продуктом, скользя по направляющим, движется по спирали вдоль вращающегося барабана, который приводит ее в действие за счет трения. Воздух может циркулировать как горизонтально, так и вертикально. Такие морозильные аппараты применяют для замораживания упакованных и неупакованных продуктов, особенно кулинарных полуфабрикатов в составе крупных технологических линий. Спиральные морозильные аппараты компактны, их работа относительно легко автоматизируется (в том числе предусмотрена автоматическая мойка, дезинфекция и сушка ленточного конвейера). Основные недостатки — это сложность конструкции и технического обслуживания, а также наличие ограничений по виду и форме продукта.

### 3.2.1.5 Флюидизационные морозильные аппараты

Эти аппараты применяют в основном для замораживания продуктов с нежной консистенцией (например, ягод) или влажных продуктов (например, нарезанных на кусочки овощей или фруктов), которые смерзаются при замораживании, то есть продуктов, подлежащих так называемой индивидуальной быстрой заморозке.

Непременным условием получения такого замороженного продукта является непрерывное движение каждой частицы продукта во взвешенном состоянии. Это достигается с помощью воздуха, подаваемого вентиляторами через охлаждающие змеевики испарителя, а затем через слой продукта (см. рис. 3.4). Скорость движения воздуха такова, что частицы продукта поднимаются и удерживаются во взвешенном состоянии. Для получения флюидизационного слоя продукт должен иметь небольшие размеры, а его форма должна приближаться к сферической.

Продукт в аппарате может располагаться и транспортироваться только в потоке воздуха в лотке с перфорированным дном и/или на сетчатой ленте конвейера. Перемещение замораживаемого продукта в лотке осуществляется за счет наклона и/или вибрации лотка. Благодаря нахождению продукта во взвешенном состоянии достигается равномерное распределение продукта в слое, предотвращается слипание и смерзание продукта, даже если он поступает очень влажным, и существенно возрастает теплопередача с поверхности продукта.

Продолжительность замораживания различных видов продукта зависит от модели флюидизационного слоя и в среднем определяется скоростью подачи продукта и объемом слоя, который ограничивается по высоте.

Флюидизационные морозильные аппараты позволяют получать замороженный продукт высокого качества, они компактны, их работа относительно просто автоматизируется, но они предназначены для замораживания только мелкоштучных продуктов и характеризуются значительной потерей массы продукта вследствие испарения и повышенным расходом энергии на работу вентиляторов.

## 3.2.2 Плиточные морозильные аппараты

Плиточные морозильные аппараты состоят из совокупности параллельно установленных металлических плит, охлаждаемых хладагентом, между которыми находят-

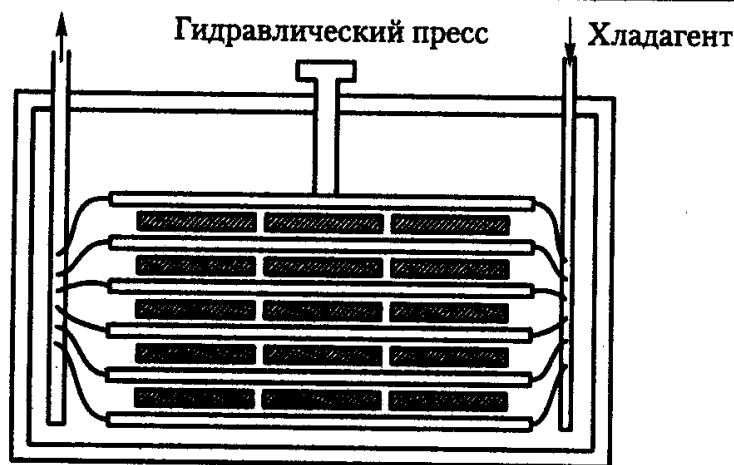


Рис. 3.6. Схема морозильного аппарата периодического действия с горизонтальными плитами

ся продукт (рис. 3.6). Плиты могут ограниченно перемещаться с помощью гидравлической системы, что требуется при загрузке и выгрузке продукта, а также для создания необходимого термического контакта с продуктом для его быстрого замораживания. Чтобы избежать чрезмерной деформации продукта при сближении плит, устанавливают сменные ограничительные пластины с такой высотой, которая несколько меньше первоначальной толщины продукта или коробки с продуктом.

Плиты могут быть установлены как горизонтально, так и вертикально. В аппаратах с горизонтальными плитами продукт, упакованный в картонные коробки или металлические формы одинаковой толщины, загружают в пространство между раздвинутыми плитами. После загрузки всего аппарата плиты сдвигаются, незначительно деформируя продукт, и начинается режим замораживания. В этих аппаратах труднее, чем в аппаратах с вертикальными плитами, автоматизировать загрузку и разгрузку продукта, и поэтому они, как правило, периодического действия.

В аппаратах с вертикальными плитами замораживают неупакованные легко деформируемые продукты (рыба, мясо, пюреобразные массы). Продукт закладывают, засыпают или заливают сверху в полости между плитами, установленными на расстоянии, равном толщине блока. Блоки между плитами формируются непосредственно в момент загрузки продукта под действием силы тяжести. Для удаления блоков после замораживания плиты нагревают, раздвигают и блоки продукта выталкиваются на разгрузочный конвейер.

К достоинствам плиточных морозильных аппаратов относятся: высокая скорость замораживания даже упакованных продуктов; замораживаемые продукты имеют постоянные форму и размер, что позволяет их без труда штабелировать, достигая при этом высокой плотности штабеля и устойчивости при последующей транспортировке; компактность; не слишком частое размораживание пластин; общая тепловая нагрузка и энергопотребление ниже, чем в воздушных аппаратах (в связи с отсутствием вентиляторов и более высокой температурой кипения хладагента).

К основным недостаткам плиточных аппаратов относятся: высокие капитальные затраты (особенно для автоматизированных и непрерывно действующих аппаратов) и пригодных для замораживания в них твердых и жидких продуктов в виде блоков.

### 3.2.3 Погружные морозильные аппараты

Эти морозильные аппараты предназначены для замораживания продуктов, погруженных в охлаждающую неизменяющую свое фазовое состояние жидкость (водный раствор соли или гликоля) или орошаемых ею штучных упакованных продуктов. Продукт упаковывают так, чтобы не было взаимного загрязнения продукта и хладоносителя. В этих аппаратах можно замораживать штучный продукт неправильной формы и значительной толщины (крупнокусковое мясо, птицу, рыбу). Хладоноситель охлаждается в испарителе, встроенном в корпус аппарата и (или) размещенном отдельно от аппарата.

Погружные аппараты характеризуются интенсивным замораживанием продукта независимо от его геометрической формы и относительно большой толщины, однако они требуют принятия дополнительных мер по соблюдению санитарно-гигиенических требований, а также учета расходов на эксплуатацию.

### 3.2.4 Криогенные морозильные аппараты

Эти аппараты предназначены для замораживания продуктов при непосредственном контакте с веществами, которые изменяют свое фазовое состояние (кипят, сублимируют) при криогенной температуре. Криогенные аппараты могут работать как непрерывно, так и циклически. Наиболее широко распространенные криогенные вещества — это жидкие азот  $N_2$  и диоксид углерода  $CO_2$ , которые безопасны при непосредственном контакте с пищевыми продуктами и инертны по отношению к материалам конструкции. Ранее для замораживания использовались хладагенты (например, R12, R22), очищенные от нежелательных примесей. Благодаря низкой температуре кипения криогенных веществ при атмосферном давлении  $-196^\circ C$  для жидкого  $N_2$  и  $-79^\circ C$  для жидкого  $CO_2$ , достигается большая разность температур и вследствие этого высокая интенсивность теплопередачи от поверхности продукта. Обычно в криогенных аппаратах замораживают продукты небольшой толщины, чтобы термическое сопротивление продукта меньше влияло на интенсивность его замораживания. Считается, что чем выше скорость замораживания, тем выше качество замороженного продукта, но следует иметь в виду, что последующее длительное хранение продукта сводит на нет это преимущество быстрого замораживания [15].

Аппараты с азотным замораживанием (азотные аппараты) получили более широкое распространение. В современных азотных аппаратах продукт замораживают в две стадии: сначала посредством газообразного азота, а затем с помощью жидкого (рис. 3.7). Это сокращает расход жидкого азота на замораживание продукта.

Аппараты, охлаждаемые  $CO_2$ , применяют для замораживания многих видов продукта (мясо, птица, рыба, овощи, готовые блюда). При подаче жидкого  $CO_2$  в охлаждаемый объем образуются пар и твердая фаза в виде снега, которая осаждается и накапливается на поверхности продукта и внутренней поверхности конструкции. Плотный слой снегообразного  $CO_2$  на поверхности продукта нежелателен, так как на границе контакта образуется газообразная прослойка, уменьшающая интенсивность теплопередачи. Поэтому в таких аппаратах продукт обычно замораживают при температурах выше  $-78^\circ C$ .



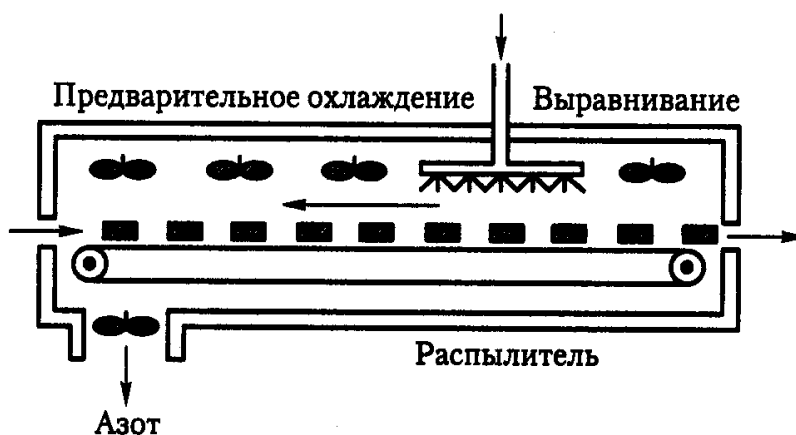


Рис. 3.7. Схема азотного морозильного аппарата непрерывного действия

Для эффективного использования криогенного вещества и получения более равномерного температурного поля в объеме продукта потоки продукта и криогенного вещества обычно движутся в противоток, а температура выпускаемого в атмосферу газа поддерживается относительно высокой (от  $-50$  до  $0^{\circ}\text{C}$ ).

Обычно жидкие  $\text{N}_2$  и  $\text{CO}_2$  транспортируют и хранят в сосудах при избыточном давлении. Чтобы сократить потерю хладагента при хранении, надо уменьшить теплоприток путем теплоизоляции и (или) охлаждения сосуда с криогенным веществом, с помощью холодильной установки. При хранении жидкого азота суточные потери могут составлять до 1% от общего объема. Поскольку жидкий  $\text{CO}_2$  можно хранить при более высокой температуре, чем азот, то с помощью холодильной установки можно полностью исключить потерю  $\text{CO}_2$ .

К основным достоинствам криогенных морозильных аппаратов можно отнести следующее: высокую скорость замораживания, достигаемую вследствие очень низких температур криогенных веществ; небольшую потерю массы и высокое качество замороженного продукта; простоту конструкции и эксплуатации; компактность; низкие капитальные затраты и энергопотребление; возможность быстрого монтажа и ввода в эксплуатацию.

Главный недостаток таких морозильных аппаратов — большие затраты на расходуемые криогенные вещества. Методы определения продолжительности замораживания, представленные в разделе 3.4, не применимы при использовании для замораживания относительно низких (ниже  $-45^{\circ}\text{C}$ ) температур.

Для сокращения потери криогенного вещества в процессе замораживания применяют комбинированное замораживание продукта — сначала криогенным веществом, затем охлажденным с помощью холодильной установки воздухом. Дело в том, что криогенным веществом в течение короткого промежутка времени можно заморозить поверхностный слой продукта, что обеспечивает минимальную потерю влаги и жесткость структуры замораживаемого продукта. Процесс замораживания завершается в аппарате с интенсивным движением воздуха. Такой комбинированный процесс замораживания обеспечивает на первом этапе высокое качество продукта при небольшом расходе криогенного вещества, на втором небольшие эксплуатационные затраты.

Жидкие и пастообразные продукты при наличии соответствующей тары можно замораживать в различных видах морозильных аппаратов. Однако есть аппараты, предназначенные специально для замораживания таких продуктов. Слой продукта замораживается на внешней или внутренней цилиндрической поверхности скребкового теплообменника-испарителя и непрерывно срезается ножами. Например, жидкая смесь при производстве мороженого частично замораживается в виде тонкого слоя на внутренней цилиндрической поверхности испарителя, называемого фризером. Образующийся слой мороженого срезается ножами и поступает в середину фризера, где с помощью мешалки насыщается воздухом, и с температурой  $-4...-6^{\circ}\text{C}$  поступает на фасовку. Последующее замораживание (так называемая закалка) мороженого осуществляется, например, в морозильном аппарате с интенсивной циркуляцией воздуха.

Для замораживания полуфабрикатов с влажной поверхностью, паштетов или пастообразных продуктов используют барабанные морозильные аппараты, в которых замораживание продукта осуществляется на внешней стороне охлаждаемого барабана. За оборот барабана продукт замораживается, срезается ножом в верхней точке и поступает на разгрузочный конвейер.

Методы расчета времени замораживания, представленные в разделе 3.4, не распространяются на замораживание жидкостей в рассмотренных аппаратах.

### 3.3 Математическое описание процесса замораживания

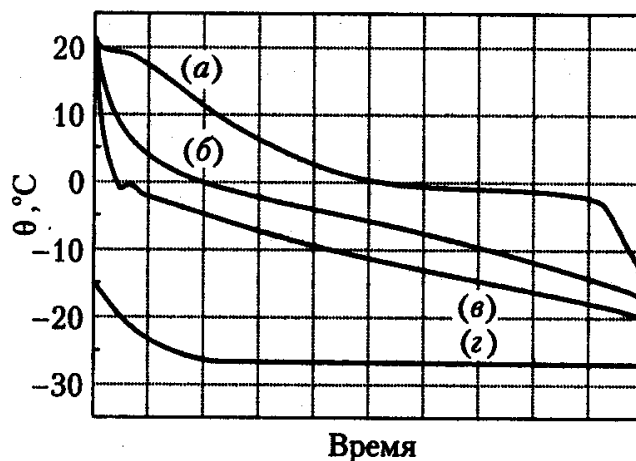
Процесс замораживания пищевых продуктов при кажущейся его простоте трудно моделировать из-за сложных физических явлений, возникающих при замерзании содержащейся в продукте воды. В процессе замораживания теплофизические свойства быстро изменяются с изменением температуры вследствие массопереноса, в частности, образования кристаллов льда.

#### 3.3.1 Физика замораживания пищевых продуктов

Теплота с поверхности пищевого продукта отводится как конвекцией (то есть воздухом или криогенным веществом), так и теплопроводностью при контакте с охлаждающей поверхностью. Как только продукт охлаждается до так называемой температуры (или точки) замерзания продукта, вода начинает замерзать. При этом образуется чистый лед, однако в пищевых продуктах концентрация растворенных веществ в оставшейся воде увеличивается, вызывая понижение температуры замерзания продукта. Следовательно, постоянной температуры замерзания продукта, как для чистой воды, в этом случае не существует, а скрытая теплота отводится в некотором диапазоне температур. Для понижения начальной температуры точки замерзания перед началом образования кристаллов льда пищевой продукт необходимо переохлаждать.

Последующий отвод теплоты из внутренней части пищевого продукта происходит вследствие теплопроводности наружной части данного продукта. Поскольку





**Рис. 3.8.** Изменение температур в процессе замораживания продукта в воздушном морозильном аппарате периодического действия: а) термического центра; б) средней точки между центром продукта и его поверхностью; в) поверхности и г) воздуха

«фронт замерзания» перемещается от поверхности к термическому центру, его форма может изменяться, что значительно усложняет математическое решение, особенно если замораживаемый продукт имеет неправильную геометрическую форму. С понижением температуры теплофизические свойства продукта, например теплопроводность и удельная теплоемкость, существенно изменяются из-за фазовых изменений воды.

Более подробно описание процесса замораживания продукта приводится в разделе 3.5. На рис. 3.8 представлены графики изменения температур продукта и воздуха в процессе замораживания пищевых продуктов в воздушном морозильном аппарате периодического действия.

### 3.3.2 Математические модели

Для описания процесса замораживания пищевых продуктов обычно используют две физические модели — так называемую модель теплопроводности с изменяющимися теплофизическими свойствами при изменении температуры и модель с условным фазным изменением на границе раздела [8, 46].

В простейшем случае для бесконечной пластины толщиной  $2R$ , симметричной относительно ее центра, модель теплопроводности с изменяющимися теплофизическими свойствами представляется дифференциальным уравнением второго порядка в частных производных:

$$\rho c(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad \text{для } 0 < x < R \quad \text{и} \quad t > 0. \quad (3.1)$$

В модели с условным фазовым изменением на границе раздела предполагается, что вся скрытая теплота освобождается при условной температуре на тонкой границе раздела фаз; теплофизические свойства в частях по обеим сторонам границы постоянны, но различны по значению; изменением плотности в процессе замораживания можно пренебречь. Для бесконечной пластины математическая модель с учетом

изложенных выше допущений может быть представлена дифференциальными уравнениями с граничными условиями:

$$\rho c_f \frac{\partial \theta}{\partial t} = k_f \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad \text{для } x_f < x < R \quad \text{и} \quad t > 0, \quad (3.2)^1$$

$$\rho c_u \frac{\partial \theta}{\partial t} = k_u \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad \text{для } 0 < x < x_f \quad \text{и} \quad t > 0, \quad (3.3)$$

$$\rho L \frac{dx_f}{dt} = k_f \left[ \frac{\partial \theta_f}{\partial x} \right]_{x_f^+} - k_u \left[ \frac{\partial \theta_u}{\partial x} \right]_{x_f^-} \quad \text{для } x = x_f \quad \text{и} \quad t > 0. \quad (3.4)$$

Для обеих моделей начальным условием является

$$\theta = \theta_i \quad \text{для} \quad 0 \leq x \leq R \quad \text{при} \quad t = 0, \quad (3.5)$$

а для модели с условно фазовым изменением на границе — лишь

$$x_f = R \quad \text{при} \quad t = 0. \quad (3.6)$$

Теплопередача от поверхности замораживаемого продукта может осуществляться в общем случае конвекцией, теплопроводностью, тепловым излучением и испарением. На практике рассчитывают каждую составляющую общего коэффициента теплопередачи. Такой подход рассматривается в разделе 3.6. При его использовании для симметричного одномерного объекта граничные условия представляют собой

$$k \frac{\partial \theta}{\partial x} = h(\theta_a - \theta) \quad \text{для } x = R \quad \text{и} \quad t > 0, \quad (3.7)$$

тогда как в центре объекта симметричные граничные условия имеют вид

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \quad \text{для } x = 0 \quad \text{и} \quad t > 0. \quad (3.8)$$

## 3.4 Определение времени замораживания

Существует две основных группы методов определения времени замораживания — численные и аналитические.

### 3.4.1 Численные методы

Численные методы (например, метод конечных разностей, метод конечных элементов) при правильной их формулировке и применении позволяют точно воспроизвести процесс замораживания путем аппроксимации дифференциальных уравнений в частных производных для решения задач теплопроводности с изменяющимися теп-

<sup>1</sup> Здесь и далее по тексту индексом  $f$  обозначается замороженное состояние продукта, а индекс  $u$  указывает на то, что продукт находится в незамороженном состоянии.



лофизическими свойствами при изменении температуры (см. уравнения 3.1, 3.5, 3.7 и 3.8) [8, 9]. Они применимы в широком диапазоне условий проведения процесса замораживания, например, при различных видах теплопередачи от поверхности продукта, для продукта сложной геометрической формы, для продуктов с различной продолжительностью процесса замораживания. При помощи этих уравнений рассчитывают также распределение температур в процессе замораживания и продолжительность замораживания продукта.

Недостатком численных методов является их математическая сложность, связанная с построением математической модели процесса, программированием и отладкой программы расчета, проверкой на адекватность. Обзор численных методов и области их применения для определения продолжительности замораживания пищевых продуктов представлены в работах [8, 46].

### 3.4.2 Аналитические методы

При решении инженерных задач замораживания продуктов точное численное решение не всегда можно получить, если принять во внимание погрешность определения теплофизических свойств замораживаемых продуктов и невозможность точно контролировать условия замораживания в аппарате на производстве. В этом случае точность определения продолжительности замораживания обуславливается не столько погрешностью расчетов, сколько степенью неопределенности используемых данных.

По этой причине были получены относительно простые уравнения, составленные на основе упрощающих предположений в отношении реальных процессов замораживания (например, модель с условным фазовым изменением на границе раздела) и опытных данных, которые во многих случаях дают не менее точные результаты, чем численные методы, при меньших затратах времени и средств.

Было получено довольно большое число подобных уравнений, обзор которых приведен в работах [8, 9, 20, 46]. Многие из них выводятся из формулы Планка, представляющей собой аналитическое решение упрощенного варианта задачи замораживания с фазовым изменением.

#### 3.4.2.1 Формула Планка

Формула Планка для однородной бесконечной пластины имеет вид:

$$t_f = \frac{\rho L}{\theta_{if} - \theta_a} \left( \frac{R}{h} + \frac{R^2}{2k_f} \right), \quad (3.9)$$

где  $\theta_{if}$  — температура замерзания (или криоскопическая температура);  $\theta_a$  — температура охлажденной среды.

Эта формула получена при следующих допущениях: пластина перед началом замораживания охлаждена до температуры замерзания; замораживание происходит при постоянной температуре замерзания; теплоемкость замороженной и незамороженной частей пренебрежимо мала по сравнению со значением скрытой теплоты замораживания; теплофизические свойства замороженной части не зависят от температуры; плотность пластины и условия теплопередачи не изменяются в процессе замораживания.



Существуют варианты формулы Планка для бесконечного цилиндра и шара, а также для параллелепипеда, но подобный аналитический подход вряд ли стоит применять для продуктов более сложной формы [8, 20].

Формула Планка во многих случаях не дает точного значения продолжительности замораживания, однако она является основой для решения класса задач замораживания, рассматриваемого в разделе 3.4.2.2, и позволяет оценить влияние отдельных переменных процесса замораживания и условий теплопередачи всего технологического процесса.

### 3.4.2.2 Рекомендуемый метод

Рекомендуемая формула для определения продолжительности замораживания продукта объединяет модифицированную формулу Планка для одномерных объектов, предложенную в работе [37], с поправкой для учета формы замораживаемого объекта, предложенной в работах [9, 22]:

$$t_f = \frac{1}{E} \left( \frac{\Delta H_1}{\Delta T_1} + \frac{\Delta H_2}{\Delta T_2} \right) \left( \frac{R}{h} + \frac{R^2}{2k_f} \right), \quad (3.10)$$

где

$$\Delta H_1 = \rho c_u (\theta_i - \theta_{fm});$$

$$\Delta H_2 = \rho L + \rho c_f (\theta_{fm} - \theta_{fin});$$

$$\Delta \theta_1 = 0,5(\theta_i + \theta_{fm}) - \theta_a;$$

$$\Delta \theta_2 = \theta_{fm} - \theta_a;$$

$$\theta_{fm} = 1,8 + 0,263\theta_{fin} + 0,105\theta_a,$$

где  $\theta_i$  — начальная температура продукта;  $\theta_{fm}$  — температура продукта по окончании процесса замораживания;  $\theta_{fin}$  — конечная температура термического центра продукта.

Точность такого метода была доказана путем сравнения с достоверными экспериментальными данными, полученными при замораживании пищевых продуктов с большим содержанием влаги (более 55% воды) в широком диапазоне условий [9, 37]. Отмеченные отклонения в пределах  $\pm 15\%$  большей частью могут быть отнесены на погрешность эксперимента.

Считается, что в условиях промышленного производства можно с достаточной точностью определить продолжительность замораживания продуктов, но так бывает довольно редко. На практике часто приходится иметь дело с пищевыми продуктами, существенно отличающимися по форме и размеру, которые замораживаются в аппарате с большим отклонением температуры и скорости движения воздуха от их средних значений. В связи с этим возникают сложности определения теплофизических свойств и коэффициентов теплопередачи с приемлемой точностью. Следовательно, из-за невозможности получить точные данные расчет продолжительности замораживания можно выполнить в лучшем случае с погрешностью около  $\pm 20\%$ . Способы получения требуемых для расчета данных с помощью уравнения (3.10) мы рассмотрим в следующих разделах.



### 3.4.3 Половинная толщина продукта

Половинная толщина  $R$  определяется как кратчайшее расстояние между термическим центром (где охлаждение происходит наиболее медленно) и охлаждаемой поверхностью продукта. Для продуктов, имеющих симметричную форму и охлаждаемых со всех сторон, термическим центром можно считать их геометрический центр, а половиной толщиной является половина наименьшего размера. Например, для шара  $R$  равна радиусу, а для параллелепипеда  $R$  равна половине наименьшего размера.

### 3.4.4 Коэффициент формы

Точное определение влияния формы пищевого продукта на скорость его замораживания довольно затруднительно. В уравнении (3.10), чтобы отразить влияние формы продукта на продолжительность замораживания, использован коэффициент формы  $E$ , учитывающий направленность теплопередачи.

#### 3.4.4.1 Расчет коэффициента формы

Коэффициент формы — это величина, определяющая, какую роль в теплопередаче играет каждое из трех пространственных измерений. Значение  $E$  всегда находится в интервале от 1 до 3. У трехмерного тела (шара) теплопередача осуществляется по всем трем измерениям одинаково, и, следовательно,  $E = 3$ . У бесконечного цилиндра задействованы два измерения, а одно в теплопередаче не участвует, поэтому  $E = 2$ . У бесконечной пластины теплопередача осуществляется только вдоль одного измерения и значит  $E = 1$ . У продукта иной формы  $E$  можно определить по формуле [9, 22]:

$$E = 1 + \frac{1 + \frac{2}{Bi}}{\beta_1^2 + \frac{2\beta_1}{Bi}} + \frac{1 + \frac{2}{Bi}}{\beta_2^2 + \frac{2\beta_2}{Bi}}. \quad (3.11)$$

Значения  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  и числа Био ( $Bi$ ) находят, используя соотношения

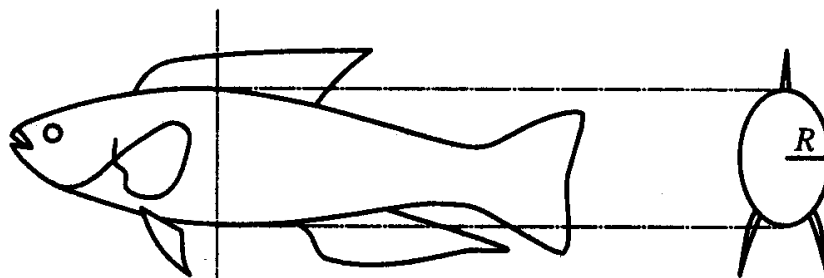
$$\beta_1 = \frac{A}{\pi R^2}; \quad (3.12)$$

$$\beta_2 = \frac{3V}{4\pi\beta_1 R^3}; \quad (3.13)$$

$$Bi = \frac{hR}{k_f}. \quad (3.14)$$

Если объем объекта  $V$  измерить непосредственно нельзя, то его определяют расчетным путем, разделив массу объекта на его фактическую плотность  $\rho$  (уравнения (3.18) и (3.25)). Величина  $A$  — это наименьшая площадь поперечного сечения продукта, проходящего через его термический центр. Поперечное сечение должно включать половинную толщину продукта.

Рассмотрим, например, целую рыбу. Явно видно, что она имеет разные размеры в трех измерениях. Для нее половинной толщиной считают расстояние от центра до бока в сечении, проходящем за жабрами, где толщина рыбы наибольшая. Значение  $A$  равно площади этого поперечного сечения.



#### 3.4.4.2 Экспериментальное определение коэффициента формы

Уравнение (3.11) позволяет определить  $E$  с большой точностью для объекта правильной геометрической формы. Однако большинство продуктов имеет неправильную форму, что затрудняет измерение  $R$ ,  $V$ ,  $A$ , а значит и получение точного значения  $E$ . Вместе с тем если имеются экспериментальные данные о замораживании продуктов неправильной формы при некоторых конкретных условиях, то значение  $E$  можно найти из уравнения (3.10). Ниже приведены значения  $E$  для некоторых пищевых продуктов неправильной формы, полученные опытным путем [11]:

Лопаточная часть бараньей туши	$E = 1,4$
Бедренная часть бараньей туши	$E = 2,0$
Говяжья полутуша	$E = 1,3$
Длинноперый тунец	$E = 1,8$

## 3.5 Теплофизические свойства

Для выполнения расчетов, связанных с определением тепловой нагрузки и продолжительности замораживания, необходимо располагать точными данными о теплофизических свойствах данного продукта. Существуют три варианта получения этих данных: из справочной литературы, экспериментальным (опытным) и расчетным путем с помощью относительно простых методов, основанных на сведениях о структуре и составе продукта. По этому вопросу имеется немало литературы [19, 23, 29–32, 36, 50].

### 3.5.1 Данные справочной литературы

Существует много литературных источников, в которых представлены данные о теплофизических свойствах продуктов. Здесь сложность заключается в выборе данных приемлемой точности. Можно рекомендовать следующие работы: для мяса и мясопродуктов — [2, 18, 19, 34, 35], для фруктов и овощей — [74], для продуктов с низким и средним содержанием влаги — [75], а для теста и хлебобулочных изделий — [43]. К сводным данным следует подходить осторожно. Например, в [2] представлен обширный перечень данных по содержанию влаги, наиболее высоким температурам замерзания, удельной теплоемкости замороженных и незамороженных продуктов и

скрытой теплоте замерзания различных пищевых продуктов. Данные по удельной теплоемкости и скрытой теплоте получены не опытным, а расчетным путем.

### 3.5.2 Экспериментальные данные

Большое число методов измерения теплофизических свойств рассмотрено в работах [24, 31, 36]. Наиболее надежные и часто используемые методы — это калориметрический (для определения энтальпии и кажущейся удельной теплоемкости) и с помощью датчиков (контрольной нагретой пластины и линейного источника) для измерения теплопроводности.

### 3.5.3 Расчетные данные

Для расчета теплофизических свойств применяют простые уравнения, в которых учитываются структура и состав продукта. Здесь главной проблемой является неоднородность состава пищевых продуктов и большое отличие по структуре продукта одного и того же наименования. По этой причине простые методы расчета, основанные на данных о составе продукта, считаются практически такими же по точности (или даже точнее), как и данные, полученные опытным путем, но с большой погрешностью. Если нет надежных опытных данных по теплофизическим свойствам пищевого продукта, то следует использовать нижеприведенные методы расчета [6, 33, 36, 46].

#### 3.5.3.1 Концептуальная модель

Основой методов определения теплофизических свойств пищевых продуктов является предположение, что пищевой продукт является однородным и состоит из ряда компонентов — воды, жира и твердых веществ, отличных от жира:

$$X_W + X_F + X_S = 1. \quad (3.15)$$

Твердая составляющая, отличная от жира, может подразделяться на углерод, белок и минеральные вещества:

$$X_S = X_C + X_P + X_M, \quad (3.16)$$

но в нижеприводимых уравнениях будем использовать только компонент  $X_S$ . При необходимости учета отдельных составляющих число слагаемых в компоненте  $X_S$  следует соответственно увеличить. Массовые доли отдельных компонентов могут быть определены путем применения стандартных лабораторных гравиметрических методов. Состав пищевого сырья и продуктов приведен в [21, 52].

Изменение теплофизических свойств в процессе замораживания зависит главным образом от фазового превращения водной составляющей из жидкости в лед. Обычно водный компонент рассматривают как смесь льда и раствора неводных компонентов в жидкости, присутствие которых вызывает снижение температуры замерзания раствора. Поскольку при замерзании вода превращается в чистый лед, оставшийся раствор становится более концентрированным, и, следовательно, температура его замерзания понижается. В результате температура замерзания пищевых продуктов находится ниже  $0^\circ\text{C}$ , а скрытая теплота замораживания реализуется в некотором диапазоне тем-



ператур, а не при постоянной температуре, как для чистого вещества. И наконец некоторая часть воды связана с некоторыми компонентами (например, с белком) и не замерзает даже при температуре ниже точки замерзания. Все это необходимо учитывать при использовании данного метода расчета теплофизических свойств продуктов.

Общий водный компонент принимается состоящим из трех частей — свободной воды, льда и связанной воды:

$$X_W = X_{LW} + X_I + X_B. \quad (3.17)$$

В некоторых случаях учитывают фазовые изменения жирового компонента. Значение этих изменений и температура, при которой они возникают, зависит от состава жиров. Обычно влияние скрытой теплоты затвердевания жира на свойства продукта незначительно по сравнению с влиянием на них скрытой теплоты замерзания воды.

### 3.5.3.2 Воздушные прослойки в упаковке и пористость продуктов

Многие пищевые продукты содержат значительный объем воздуха, который находится в объеме продукта, имеющего пористую структуру; например, в мякоти яблока обычно содержится от 10 до 20% по объему воздуха и (или) в объеме упакованного продукта (например, воздушные зазоры между нарезанными кубиками пиццы, а также пиццей и картонной коробкой, в которую она упакована).

Воздух, находящийся в замораживаемом продукте, оказывает значительное влияние на теплофизические свойства продукта. Степень этого влияния зависит от объема воздуха в объеме твердой части (каркаса) продукта. Относительный объем пор в объеме продукта определяют количественно величиной, называемой пористостью  $\epsilon$ .

Пористость продукта может быть рассчитана по общей массе, объему и плотности каркаса пищевого продукта по формуле

$$\epsilon = 1 - \frac{W}{V\rho_{\epsilon=0}}. \quad (3.18)$$

Пористость влияет в основном на плотность и теплопроводность продукта, а удельная теплоемкость и энтальпия зависят от массы продукта, поэтому массой воздуха в порах можно пренебречь. В данных по плотности и теплопроводности, взятых из специальной литературы, будет заложена информация о влиянии пустот внутри пористых материалов, чего нельзя сказать о влиянии пустот, возникающих в результате размещения изделий в упаковке.

### 3.5.3.3 Понижение температуры замерзания, доля вымороженной воды и связанная вода

Применив закон Рауля (Raoult's) о слабых растворах и уравнение Клапейрона–Клаузиуса (Clausius–Clapeyron), можно получить зависимость понижения температуры замерзания от массовых долей компонентов данного пищевого продукта [46]:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0 \cdot C} - \frac{RM_W}{L'} \ln \left( \frac{(X_W - X_I - X_B)/M_W}{(X_W - X_I - X_B)/M_W + (X_S + X_F)/M_E} \right). \quad (3.19)$$



Эффективная молярная масса неводных компонентов  $M_E$ , которые по допущению являются растворимыми, может быть найдена при помощи этого уравнения, если известна температура замерзания  $\theta_{if}$ , полученная подстановкой  $X_I = 0$  и  $T = \theta_{if} + T_0 \cdot C$ . Кроме того, если правильно определены растворимые твердые компоненты, то выражение  $(X_S + X_F)/M_E$  может быть рассчитано путем суммирования  $X/M$  по каждому из этих растворимых компонентов [45].

Если известно значение  $\theta_{if}$ , то, используя уравнение (3.19),  $X_I$  можно увязать с температурой следующим образом:

- при температуре ниже  $\theta_{if}$

$$X_I = (X_W - X_B) \left[ 1 - \frac{\exp\left(\frac{L'M_W}{RT_{if}}\right) - \exp\left(\frac{L'M_W}{RT_0 \cdot C}\right)}{\exp\left(\frac{L'M_W}{RT}\right) - \exp\left(\frac{L'M_W}{RT_0 \cdot C}\right)} \right]; \quad (3.20)$$

- при температуре выше  $\theta_{if}$

$$X_I = 0. \quad (3.21)$$

В работе [45] показано, что для растворов слабых электролитов с небольшой потерей точности вместо уравнения (3.20) можно использовать зависимость:

$$X_I = (X_W - X_B) \left( 1 - \frac{\theta_{if}}{\theta} \right). \quad (3.22)$$

Чтобы рассчитанные по уравнению (3.20) или (3.22) значения  $X_I$  были точными, необходимо иметь точное значение  $\theta_{if}$ . Имеющиеся в литературе данные по значению  $\theta_{if}$  для пищевых продуктов зачастую искажены за счет округления (особенно при переводе из градусов Фаренгейта в градусы Цельсия и наоборот). Поэтому их следует применять с большой осторожностью.

Таблица 3.2. Значения  $b$  для некоторых пищевых продуктов [36, 38, 45]

Вид продукта	Диапазон $b$
Мясо, рыба	0,14–0,32
Сахароза	0,30
Глюкоза *	0,15–0,20
Яйца	0,11
Хлеб	0,11–0,14
Апельсиновый сок	0
Овощи	0,18–0,25



Для рыбы, мяса, фруктов и овощей значение  $\theta_{if}$  находится в диапазоне температур от  $-2,0$  до  $-0,5$  °С. Для продуктов с высоким содержанием влаги ( $> 55\%$  воды) в первом приближении можно принимать  $\theta_{if} = -1,0$  °С (если невозможно произвести более точный расчет).

Для расчета  $X_I$  необходимо знать массовую долю связанной воды, которая зависит от массовой долей сухих веществ

$$X_B = bX_S. \quad (3.23)$$

Значения  $b$  для некоторых пищевых продуктов представлены в табл. 3.2. В случае, когда нет возможности получить более точные данные, принимать  $b = 0,25$ .

### 3.4.3.4 Плотность

Плотность продуктов, состоящих из компонентов, подчиняется закону аддитивности и определяется по уравнению:

$$\frac{1}{\rho_{\epsilon=0}} = \sum_j \frac{X_j}{\rho_j}. \quad (3.24)$$

Плотность пористых продуктов находят по уравнению:

$$\rho = \rho_{\epsilon=0}(1 - \epsilon). \quad (3.25)$$

### 3.5.3.5 Удельная теплоемкость

Удельная теплоемкость пищевых продуктов, как и плотность, подчиняется закону аддитивности. Для определения плотности при температуре выше  $\theta_{if}$  рекомендуется уравнение

$$c = \sum_j X_j c_j. \quad (3.26)$$

Если температура продукта ниже  $\theta_{if}$ , то следует учитывать влияние фазового изменения воды, и для этого были разработаны несколько моделей [33, 45]. Для большинства пищевых продуктов с высоким содержанием влаги различие между этими моделями невелико. В работе [45] представлена одна из самых простых моделей, основанная на уравнении (3.22) и допускающая, что теплоемкости отдельных компонентов при изменении температуры постоянны:

$$c = c_u - (X_W - X_B) \left[ \frac{L' \theta_{if}}{\theta^2} + (c_W - c_I) \right]. \quad (3.27)$$

В работе [46] была предложена более сложная модель использования уравнения (3.20) для частичек льда, где учтено изменение  $c_I$  и  $L'$  с изменением температуры. Принимая во внимание возможные погрешности при определении  $\theta_{if}$  и  $X_B$ , для многих пищевых продуктов можно использовать уравнение (3.27).

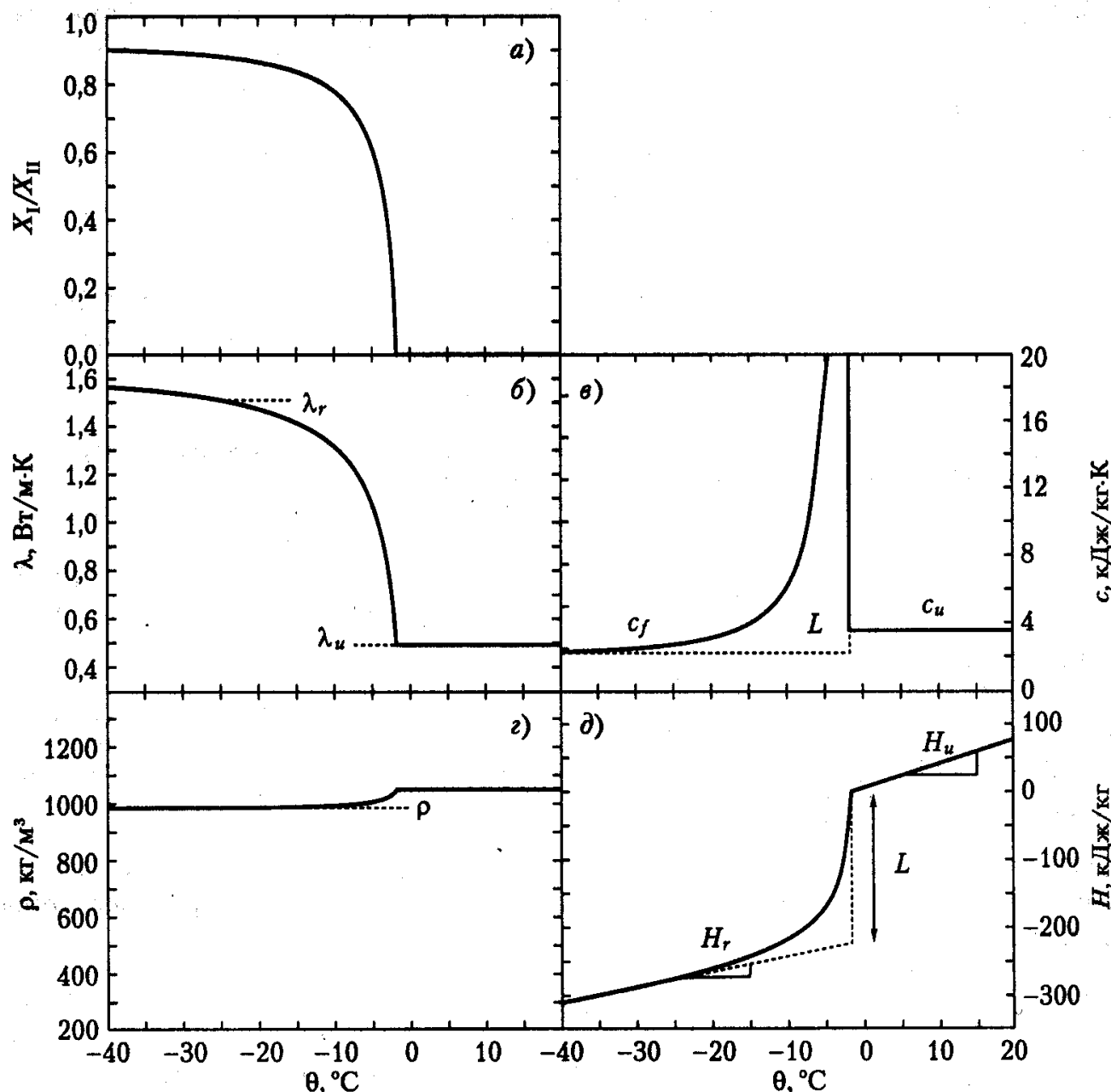


Рис 3.9. Зависимость теплофизических свойств пищевых продуктов с высоким содержанием влаги от температуры: а) доли вымороженной воды ( $X_I/X_{II}$ ); б) теплопроводности; в) удельной теплоемкости; г) плотности; д) энтальпии

### 3.5.3.6 Энтальпия и скрытая теплота

Принимая  $H = 0$  при  $\theta = \theta_{if}$  и допуская, что величины  $c$  и  $L'$  для отдельных компонентов постоянны при изменении температуры, из уравнений (3.26) и (3.27) можно получить зависимости для энтальпии:

— при температуре  $\theta > \theta_{if}$

$$H = (\theta - \theta_{if}) c_u = (\theta - \theta_{if})(X_W c_W - X_F c_F + X_S c_S); \quad (3.28)$$

– при температуре  $\theta < \theta_{if}$

$$H = (\theta - \theta_{if}) \left( c_u - (X_W - X_B) \left[ \frac{L'}{\theta} + (c_W - c_I) \right] \right). \quad (3.29)$$

Скрытая теплота замерзания  $L$  зависит исключительно от фазового изменения воды; другие компоненты просто охлаждаются. Значение  $L$  можно оценить по скрытой теплоте массовых долей воды и льда при той температуре, при которой продукт практически полностью заморожен (для пищевых продуктов с большим содержанием влаги эта температура составляет  $-25^\circ\text{C}$ , см. раздел 3.5.4)

$$L = X_I L'. \quad (3.30)$$

Графический метод определения  $L$  представлен на рис. 3.9d.

Если для расчета времени замораживания используют уравнения, учитывающие изменение энтальпии в процессе замораживания (например, между  $\theta_{if}$  и конечной температурой, в частности  $-10^\circ\text{C}$ ), то для расчета изменяющейся энтальпии следует применять уравнения (3.28) и (3.29), а не уравнение (3.30), в котором определяется только скрытая теплота.

### 3.5.3.7 Теплопроводность

Существует много моделей расчета теплопроводности пищевых продуктов, большая часть которых базируются на учете объемных долей, которые (за исключением пористости) рассчитываются по формуле

$$v_j = \frac{\rho_{\epsilon=0} X_j}{\rho_j}. \quad (3.31)$$

Модели расчета теплопроводности широко представлены в работах [33, 36, 41]. Для расчета теплопроводности гомогенных (непористых) продуктов во всем диапазоне температур рекомендуют использовать модель с параллельным расположением компонентов [33]. Различные модели расчета теплопроводности для широкого диапазона гомогенных пищевых продуктов при температурах как выше, так и ниже их точки замерзания рассматриваются в работе [36]. Считается, что при температурах выше точки замерзания лучше всего использовать простую модель с параллельным расположением компонентов. При температурах ниже точки замерзания предлагается использовать комбинированную модель с параллельно-последовательным расположением компонентов.

Для гомогенных пищевых продуктов животного происхождения рекомендуется модифицированная модель Максвелла–Эйкена (*Maxwell–Eucken*) [41]. По сравнению с другими эта модель несколько сложнее, так как, будучи двухфазовой, она последовательно применяется ко всем компонентам. Комбинированная параллельно-последовательная модель не проверялась. Согласно [41], при температурах выше  $\theta_{if}$  различие в точности расчета между моделями меньше, чем для условий, когда про-

дукт заморожен, и модель с параллельным расположением компонентов лишь незначительно хуже модели Максвелла–Эйкена.

Таким образом, для продуктов при температуре выше  $\theta_{if}$  следует использовать параллельную модель:

$$k_{\varepsilon=0} = \sum_j v_j k_j = \rho_{\varepsilon=0} \sum_j \frac{X_j k_j}{\rho_j}, \quad (3.32)$$

а для продуктов при температуре ниже  $\theta_{if}$  лучше применять параллельно-последовательную модель, которая является своеобразным компромиссом простоты и точности:

$$\frac{1}{k_{\varepsilon=0}} = \frac{v_{LW} + v_B}{k_W} + \frac{(1 - v_{LW} - v_B)^2}{\sum_{j \text{ не } LW, B} v_j k_j}. \quad (3.33)$$

В настоящее время использовать сложные модели расчета теплопроводности, особенно при температуре ниже  $\theta_{if}$ , вряд ли оправдано, так как результаты расчета практически не отличаются по точности.

Для пористых пищевых продуктов, замораживаемых в промышленных условиях, разработано очень мало методов расчета теплопроводности  $k$  с учетом  $k_{\varepsilon=0}$  и  $\varepsilon$ .

В работе [33] рекомендуется использовать модель с параллельным расположением компонентов (хотя сравнительная база для оценки разных моделей очень мала), причем было обнаружено, что уравнение Максвелла–Эйкена дает ту же точность результатов. В работе [36] проведена оценка девяти моделей для пористых пищевых продуктов, и в лучшей из них используется 12 эмпирических констант, которые могут применяться лишь для пищевых продуктов с  $\varepsilon > 0,08$  и  $X_W < 0,3$  (куда не входит диапазон значений, необходимых для замораживания пищевых продуктов). На втором месте — модель Максвелла–Эйкена.

В настоящее время для расчета теплопроводности продуктов в промышленных условиях следует использовать относительно простую модель Максвелла–Эйкена.

Для пористых продуктов уравнение Максвелла–Эйкена имеет вид:

$$k = k_{\varepsilon=0} \left[ \frac{2k_{\varepsilon=0} + k_a - 2\varepsilon(k_{\varepsilon=0} - k_a)}{2k_{\varepsilon=0} + k_a + \varepsilon(k_{\varepsilon=0} - k_a)} \right]. \quad (3.34)$$

В данной модели расчета предполагается, что пустоты распределяются равномерно по всей упаковке, толщина их небольшая, движение воздуха внутри этих пустот мала. Для некоторых продуктов подобных условий не наблюдается, и для них использовать эту модель следует с большой осторожностью. К другим моделям расчета, которые могут дать приемлемый по точности результат, относятся модифицированное Леви уравнение (3.34) и теория рабочей среды, описанные в работе [41].



Таблица 3.3. Средние значения теплофизических свойств отдельных компонентов пищевых продуктов (по [6, 33, 41])

Компонент	$\rho_j$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_j$ , Дж/кг · К	$k_j$ , Вт/м · К
Вода	1000	4180	0,56
Лед	917	2110	2,22
Воздух	1,3	1005	0,025
Жир	930	1900	0,18
СВ	1450	1600	0,22
Белок	1380	1900	0,20
Углеводород	1550	1500	0,245
Минеральные вещества	2165	1100	0,26

Примечание:  $L' = 334$  кДж/кг.

### 3.5.3.8 Теплофизические свойства отдельных компонентов пищевых продуктов

Для решения приведенных выше уравнений требуются данные по теплофизическим свойствам отдельных компонентов. В работе [6] приведены уравнения для расчета теплофизических свойств компонентов в температурном диапазоне от  $-40$  °С до  $150$  °С. Хотя эти свойства с изменением температуры меняются, для упрощения расчетов применяют средние значения, приведенные в табл. 3.3.

## 3.5.4 Упрощенный метод расчета теплофизических свойств

Для расчета теплофизических свойств пищевых продуктов во всем диапазоне температур, представляющих интерес, могут быть использованы уравнения (3.15)–(3.34). Теплофизические свойства некоторого пищевого продукта, содержащего 76% воды, 6,5% жира, 17,5% твердого компонента, имеющего  $M_E = 359$  и  $b = 0,23$ , приведены на рис. 3.9.

Рассмотренный выше простой метод определения продолжительности замораживания требует конкретных данных как для незамороженных, так и для полностью замороженных пищевых продуктов. Как видно из рис. 3.9, свойства продукта значительно меняются с изменением температуры, особенно при температуре ниже точки замерзания. Для расчета характерных значений свойств можно использовать уравнения (3.15)–(3.34) со средними значениями свойств отдельных компонентов.

Для замороженных продуктов при оценки значения  $X_I$  следует также определить температуру, при которой продукт можно считать полностью замороженным. В качестве таковой обычно принимается температура  $-25$  °С, поскольку именно она считается типичной конечной температурой замораживания и последующего хранения пищевого продукта на холодильнике. Для большинства продуктов с высоким содержанием влаги при температуре ниже  $-25$  °С значение  $X_I$  изменяется незначительно.

Таким образом, для расчета свойств, необходимых для определения продолжительности замораживания пищевых продуктов, можно рекомендовать следующую последовательность действий:

- находится  $\theta_{if}$  (см. п.п. 3.5.3.3);
- рассчитывается  $X_B$  по уравнению (3.23);



- для полностью замороженных продуктов находятся  $X_I$  и  $X_{LW}$  при температуре  $-25^\circ\text{C}$  по уравнениям (3.22) и (3.17) соответственно; для незамороженных продуктов вместо  $X_{LW}$  и  $X_B$  используются  $X_I = 0$  и  $X_W$ ;
- определяются  $c_{\epsilon=0}$ ,  $\epsilon$  и  $c$  по уравнениям (3.18), (3.24) и (3.25) для полностью замороженных продуктов;
- рассчитываются  $c_u$  и  $c_f$  по формуле (3.26);
- для пористых продуктов находят  $k_{f,\epsilon=0}$  по формуле (3.33) при температуре  $-25^\circ\text{C}$  и  $k_f$  по формуле (3.34);
- рассчитывают  $L$  по формуле (3.30).

Плотность продукта во время замораживания изменяется очень мало, поэтому ее влиянием на время замораживания можно пренебречь.

## 3.6 Коэффициенты теплопередачи

Теплопередача на поверхности неупакованного пищевого продукта может осуществляться вследствие одновременного действия нескольких видов теплопередачи — конвекции, теплового излучения и испарения. Кроме того, для упакованных продуктов следует учитывать сопротивление теплопередаче упаковочного материала и воздушного зазора между поверхностью продукта и упаковкой. Суммарное значение теплопередачи оценивают коэффициентом эффективной теплопередачи  $h$ , значение которой в течение всего процесса замораживания обычно принимается постоянной и одинаковой по всей поверхности продукта.

При наличии нескольких последовательно расположенных сопротивлений теплопередаче суммарное его значение находят по формуле:

$$\frac{1}{h} = \frac{1}{h_c} + \sum \frac{x_p}{k_p} + \frac{x_a}{k_a}, \quad (3.35)$$

где  $\frac{x_p}{k_p}$  — составляющая, обусловленная наличием упаковки; коэффициент конвективной теплопередачи равен

$$h_c = h_{con} + h_{rad} + h_{evap}. \quad (3.36)$$

Теплопередача вследствие испарения влаги с поверхности продукта учитывается посредством коэффициента псевдоконвективной теплопередачи испарением по зависимости

$$h_{evap} = \frac{K(p_s - p_a)H_{lg}}{\theta_s - \theta_a}, \quad (3.37)$$

Здесь  $K$  — величина, учитывающая сопротивления массопередаче поверхностного слоя продукта, упаковки и пограничного слоя воздуха;  $\theta_s$  — температура поверхности продукта.



Уравнение (3.37) редко используют из-за сложности определения  $K$ , сложности измерения или вычисления  $c_s$  как функции  $\theta_s$  (что требует решения нелинейного уравнения и зависит от активности содержащейся в продукте воды), а также из-за изменений значений  $\theta_s$ ,  $c_s$  и, следовательно,  $h_{evap}$  в широком диапазоне в зависимости от времени и места расположения на поверхности в процессе замораживания.

Считается, что влияние теплопередачи испарением относительно мало по сравнению с воздействием излучения и конвекции, это справедливо в отношении упакованных продуктов, но в других случаях влияние испарения может быть существенным. В работе [17] на основе допущения, что  $K$  может быть рассчитано по  $h_{con}$  с учетом аналогии между тепло- и массопередачей, что сопротивление поверхностного слоя продукта мало, отмечается, что  $h_{evap}$  для неупакованных продуктов с высоким содержанием влаги может составлять более 20% от  $h_{con}$  при обычных температурах поверхности.

Допуская, что температура одного из теплообменивающихся источников излучения равна температуре поверхности продукта, а другого — температуре охлаждающего воздуха, коэффициент псевдоконвективной теплопередачи излучением можно представить следующим образом:

$$h_{rad} = \sigma \epsilon \Gamma (T_a^2 + T_s^2) (T_a + T_s). \quad (3.38)$$

Коэффициент излучения (черноты)  $\epsilon$  для большинства пищевых продуктов и упаковочных материалов равен примерно 0,9. Температура охлаждающего воздуха обычно находится в диапазоне от  $-20$  до  $-50$  °С, а температура поверхности продукта обычно ниже  $-5$  °С. В этих условиях и при максимальном  $G$ , равном 1,0,  $h_{rad}$  находится в пределах от 2 до 5 Вт/(м<sup>2</sup> · К), но наиболее вероятно, что она будет равна примерно 3 Вт/(м<sup>2</sup> · К). На практике при плотной укладке продуктов значение  $\Gamma$  будет меньше 1,0, а температура воздуха может быть ближе к температуре поверхности продукта. Следовательно, влияние теплового излучения на практике может быть ниже, чем предполагается теоретически.

По конвективной теплопередаче имеется большое число опубликованных данных. Теплопередача в процессе замораживания пищевых продуктов рассмотрена в работах [1, 2, 17].

Нижеприведенные зависимости и значения  $h_c$  могут применяться для широкого диапазона условий замораживания и учитывать теплопередачу испарением и тепловым излучением.

### 3.6.1 Замораживание в плиточном морозильном аппарате

При замораживании продуктов в плиточном аппарате в значении  $h_c$  учитываются сопротивления теплопередаче между хладагентом и стенкой плиты, стенки плиты и между поверхностью плиты и пищевым продуктом (или его упаковкой). Обычно доминирует термическое сопротивление в области контакта плиты с продуктом, вызванное наличием воздушных прослоек. При наличии тонкой воздушной прослойки значение  $h_c$  может быть низким — от 50 до 100 Вт/(м<sup>2</sup> · К) [12]. При хорошем тепловом контакте значение  $h_c$  обычно находится в диапазоне от 200 до 500 Вт/(м<sup>2</sup> · К), и воздушный зазор между пластиной и упаковкой не образуется [14]. Термическое сопротивление контакта зависит от приложенного к плитам давления, деформируемо-





сти продукта и упаковки, плотности упаковки. Исполнение упаковки должно обеспечивать хороший тепловой контакт между плитами и продуктом с минимальной деформацией упаковки при заданном давлении плит.

### 3.6.2 Замораживание в воздушном аппарате

При замораживании продуктов в потоке воздуха значение  $h_c$  зависит от скорости движения воздуха, размеров и формы замораживаемого продукта, а также от расположения продукта относительно воздушного потока.

При естественной конвекции (скорость воздушного потока менее 0,4 м/с) основное уравнение имеет вид [13]:

$$h_{con} = 2,3(\theta_s - \theta_a)^{0,25}. \quad (3.39)$$

При обычной разности температур от 2 до 30 К и компоненте теплового излучения от 3 до 4 Вт/(м<sup>2</sup> · К) из уравнений (3.39) и (3.36) следует, что  $h_c$  при естественной конвекции обычно находится в диапазоне от 5 до 10 Вт/(м<sup>2</sup> · К).

При принудительной конвекции (вентилятор создает скорость движения воздуха более 1,0 м/с) и замораживании крупногабаритных единичных по исполнению продуктов, не соприкасающихся друг с другом, применяют следующие уравнения [11]:

- для объектов с плоской поверхностью

$$h_c = 7,3u_a^{0,8}, \quad (3.40)$$

- для объектов овальной формы

$$h_c = 12,5u_a^{0,6}. \quad (3.41)$$

Зависимости для расчета  $h_c$  в процессе замораживания: прямоугольных картонных коробок в аппарате с перекрестным движением воздуха [42]; в воздухе, обдувающим сверху плоские блоки [5]; гамбургеров с говядиной в конвейерных аппаратах [16]; цыплят и индеек в воздушном аппарате [27, 28], а также других продуктов в различных условиях [1, 2], дают значения, практически совпадающие со значениями, полученными по вышеприведенным простым формулам.

Для флюидизационных и конвейерных морозильных аппаратов, в которых замораживается штучный продукт небольшого размера в условиях частичной флюидизации слоя, значение  $h_c$  существенно больше по сравнению с замораживанием более крупного единичного продукта в воздушном аппарате. Типичные значения  $h_c$  находятся в диапазоне от 120 до 200 Вт/(м<sup>2</sup> · К). Некоторые зависимости для расчета  $h_c$  представлены в работах [25, 51].

### 3.6.3 Замораживание погружением в жидкость и криогенное замораживание

При замораживании продукта, погруженного в жидкость, определяющей является конвективная теплопередача. В погружных аппаратах значение  $h_c$  выше, чем в воз-

душных аппаратах при одинаковой скорости движения потока. Это происходит из-за большей плотности и теплопроводности жидкостей по сравнению с воздухом. При замораживании продукта в водном растворе солей и гликоля значения  $h_c$  принимают от 300 до 600 Вт/(м<sup>2</sup> · К) [18, 46].

Данные, касающиеся значений  $h_c$  и  $(\theta_s - \theta_c)$  при криогенном замораживании жидкими азотом и хлорфторуглеродом R12, приведены в работах [4, 46]. При замораживании продукта путем орошения жидким азотом значения  $h_c$ , по всей вероятности, будут находиться в диапазоне от 150 до 250 Вт/(м<sup>2</sup> · К). Данных о значениях  $h_c$  при замораживании сублимирующим твердым диоксидом углерода довольно мало, но  $h_c$  могут быть ниже, чем при замораживании жидким криогенным веществом из-за худшего теплового контакта с продуктом.

### 3.6.4 Упаковка и воздушные зазоры

При замораживании упакованных продуктов следует учитывать дополнительные сопротивления теплопередаче упаковочного материала, контактного и воздушного зазора, образующегося между несколькими слоями упаковки или между упаковкой и поверхностью продукта. При расчетах следует суммировать эти термические сопротивления [12]. Типовые значения  $k_p$  для некоторых упаковочных материалов представлены в табл. 3.4.

Рассчитать или измерить толщину воздушных зазоров, оказывающих существенное влияние на общий коэффициент теплопередачи, довольно сложно. Уравнение (3.35) содержит компонент, учитывающий наличие воздушного зазора небольшой толщины, но в случае большого зазора со значительной свободной конвекцией сопротивление теплопередаче будет меньше расчетной. Для многих пищевых продуктов, плотно упакованных в картонные коробки (с небольшой «пористостью»), тол-

Таблица 3.4. Типовые значения теплопроводности для упаковочных материалов, предназначенных для пищевых продуктов [2, 11, 12, 14, 18, 46]

Упаковочный материал	Диапазон $k_p$ Вт/(м · К)	Типичное значение $k_p$ Вт/(м · К)
Твердый картон	0,06–0,08	0,065
Гофрированный картон	0,04–0,065	0,048
Бумага		0,13
Древесина (мягкая)	0,1–0,2	0,12
Полиэтилен высокой плотности		0,48
Полиэтилен низкой плотности		0,33
Полипропилен		0,12
Политетрафторэтилен		0,26
Воздух	0,021–0,027	0,025
Алюминий	200–270	220
Сталь	40–50	45



щина воздушного зазора составляет от 0 до 3 мм, и уместно предположить, что воздух в нем неподвижен.

В плиточных аппаратах контактное сопротивление между слоями упаковки при создаваемом давлении 310 кПа находится в диапазоне от 0,0015 до 0,01 Вт/(м<sup>2</sup> · К), что соответствует воздушному зазору толщиной менее 0,3 мм [14].

Поверхностный слой некоторых продуктов может иметь теплопроводность более низкую, чем основной массы продукта (например, слой жира на куске говядины). При расчете этот слой можно принять как дополнительный «слой упаковки» с соответствующим значением  $h$ .

В большинстве случаев замораживания теплоемкость упаковочного материала по сравнению с теплоемкостью пищевого продукта пренебрежимо мала. Учитывая разнообразное число слоев упаковочного материала над поверхностью продукта и их разную толщину, следует принимать их средние значения (например, в картонных коробках в связи с особенностями их конструкции некоторые части поверхностей могут состоять из нескольких слоев, а другие — из одного слоя). Этим средним значениям должны быть присвоены весовые коэффициенты таким образом, чтобы упаковка поверхностей, расположенных непосредственно над термическим центром продукта, имела наибольший весовой коэффициент. К сожалению, в имеющейся литературе отсутствуют какие-либо количественные рекомендации по этому поводу.

### 3.7 Тепловые нагрузки

Тепловая нагрузка, характеризующая процесс замораживания продукта, должна быть известна для выбора холодильной установки требуемой мощности (холодопроизводительности) и оценки потребности в энергии для работы морозильного аппарата. Тепловая нагрузка состоит из нескольких компонентов, в том числе двух ос-

Таблица 3.5. Соотношения компонентов тепловой нагрузки для морозильных аппаратов

Вид аппарата	Тепловая нагрузка, %				
	от продукта	от нагнетателей	в период подготовки	при оттаивании*	прочая**
Воздушный с циркуляцией периодического действия	50–80	10–40	< 10	< 5	< 5
Воздушный с циркуляцией непрерывного действия	50–80	10–40	0	10–20	5–10
Плиточный	85–95	5–10	< 5	< 5	< 5
Криогенный	85–95	< 10	< 5	0	< 10

Примечания.

\* Оттаивание аппаратов периодического действия и плиточных аппаратов производится во время нерабочей части цикла, а для аппаратов непрерывного действия — без прерывания процесса замораживания.

\*\* Через изоляцию, от инфильтрации воздуха, от оборудования помимо вентиляторов, через изоляцию сосудов для хранения жидкого азота.



новных: от замораживаемого продукта и электродвигателей вентиляторов (насосов для плиточных или погружных морозильных аппаратов).

К менее значимым относятся компоненты, связанные с теплопритоками: через изоляцию; от инфильтрации воздуха, от прочего оборудования (например, электродвигателей конвейеров), при оттаивании испарителей и от элементов конструкции аппарата, нагретых при подготовке аппарата периодического действия к рабочей части цикла.

Рекомендуемые соотношения компонентов тепловой нагрузки для морозильных аппаратов различных видов приведены в табл. 3.5.

### 3.7.1 Продукт

В морозильных аппаратах непрерывного действия тепловая нагрузка от замораживаемого продукта будет постоянной во время работы. В аппаратах периодического действия максимальная тепловая нагрузка возникает в начале процесса замораживания, а затем она уменьшается. Средняя тепловая нагрузка от продукта рассчитывается по формуле

$$\phi_{pr} = \frac{W_{pr}}{t_{pr}} \left[ c_u (\theta_i - \theta_{if}) + L + c_f (\theta_{if} - \theta_{out}) \right]. \quad (3.42)$$

Для аппаратов непрерывного действия  $W_{pr}$  — масса продукта в аппарате в любой момент при замораживании, а  $t_{pr}$  — продолжительность пребывания продукта в аппарате ( $W_{pr}/t_{pr}$  равно производительности аппарата).

В аппаратах периодического действия  $W_{pr}$  — масса загруженного в аппарат продукта, а  $t_{pr}$  — продолжительность цикла замораживания продукта. Следует заметить, что в конце процесса замораживания появляется температурный градиент от центра продукта к его поверхности, а конечная среднеобъемная температура  $\theta_{out}$  будет ниже конечной температуры в термическом центре ( $\theta_{fin}$ ), но выше температуры воздуха  $\theta_a$ .

### 3.7.2 Вентиляторы и насосы

Тепловая нагрузка от вентилятора определяется количеством потребленной энергии:

$$\phi_{fan} = \frac{Q_a \Delta P_a}{\eta_{fan} \eta_m}. \quad (3.43)$$

Аналогичное по структуре уравнение можно использовать для определения тепловой нагрузки от насосов. Сложность использования уравнения (3.43) заключается в том, что для большинства морозильных аппаратов трудно оценить падение давления в контуре, в котором циркулирует охлаждающий воздух. Большая часть падения давления возникает в змеевиках испарителя. Конечно, фирмы-изготовители испарителей должны указывать значение этого падения давлений, но влияние образования инея на падение давления трудно прогнозировать. В морозильных аппаратах с интенсивной циркуляцией воздуха зачастую наблюдается существенный перепад давлений в области размещения продукта вследствие относительно малых попереч-

ных сечений воздушных каналов и высоких скоростей движения воздуха, необходимых для обеспечения теплопередачи. Суммарное падение давления в циркуляционном контуре точно определить трудно, но обычно оно составляет от 100 до 250 Па в зависимости от вида и типа морозильного аппарата.

Требуемая подача воздуха определяется необходимостью создания заданной скорости обдува продукта и площадью поперечного сечения воздушного потока в морозильном аппарате, и она должна быть согласована с площадью теплопередающей поверхности испарителя и скоростью движения воздуха в нем.

Конечно, установленные вентиляторы должны создавать разность давлений, равную прогнозируемому падению давления в циркуляционном контуре. Производительность вентиляторов определяется по данным завода-изготовителя. Значение КПД вентилятора  $\eta_{fan}$  составляет обычно от 50 до 70%, и он не должен существенно уменьшаться по мере увеличения падения давления  $\Delta P$  вследствие образования инея. Аналогично, КПД электродвигателя  $\eta_m$  составляют от 85 до 95% в зависимости от качества.

Увеличение скорости движения воздуха повышает теплопередачу в испарителе и от продукта, но при этом значительно возрастает энергопотребление вентилятора. А в итоге затраты на замораживание продукта могут возрастать. Поэтому при проектировании морозильного аппарата надо учитывать зависимость мощности, потребляемой вентилятором, от скорости движения воздуха:

$$\phi_{fan} = \omega_a^{2-3} \quad (3.44)$$

Учет этого влияния проиллюстрирован в примерах 5 и 8 (пп. 3.9.5 и 3.9.8).

Существует ошибочное мнение, что при размещении электродвигателя вентилятора вне охлаждаемого объема тепловую нагрузку от вентилятора можно исключить из общей тепловой нагрузки. Однако в действительности тепловую нагрузку от вентилятора можно сократить только на значение, равное КПД электродвигателя вентилятора (не более 15%).

### 3.7.3 Теплоприток через изоляцию и инфильтрация воздуха

Теплоприток через изоляцию обычно незначителен, но при ее повреждении влага может конденсироваться и даже замерзнуть внутри изоляции, что, в свою очередь, может вызвать как увеличение тепловой нагрузки, так и разрушение изоляции.

В морозильных аппаратах, работающих непрерывно, воздух из помещения поступает в аппарат через загрузочное и разгрузочное окна, создавая значительную тепловую нагрузку и увеличивая интенсивность образования инея в испарителе. Для уменьшения инфильтрации воздуха необходимо принимать особые меры, например, предусматривать тамбуры, воздушные и пластиковые завесы, минимизировать размеры загрузочных и разгрузочных окон и др.

### 3.7.4 Оттаивание

Учет тепловой нагрузки, возникающей при оттаивании испарителя, особенно важен при непрерывной работе морозильного аппарата. В этом случае для обеспечения заданной температуры охлаждающего воздуха в аппарате необходимо выключать из

работы и изолировать от охлаждаемого объема каждую поочередно оттаиваемую секцию испарителя. Мощность (холодопроизводительность) холодильной установки должна быть рассчитана на такое отключение секции испарителя и дополнительную тепловую нагрузку на период оттаивания.

Существуют и другие варианты проведения оттаивания испарителя, например, в этот период уменьшают подачу замораживаемого продукта или вообще прекращают замораживание. Последний вариант зачастую представляется целесообразным, так как для проведения оттаивания можно использовать перерывы в работе (на санитарную обработку, на прием пищи и т. п.).

Возможным решением проблемы оттаивания является применение таких испарителей, теплопередающие змеевики которых в процессе работы орошаются незамерзающей при рабочей температуре кипения жидкостью, например, гликолем. Однако стоимость такого испарителя значительно выше традиционного, и, кроме того, возрастают затраты, связанные с его эксплуатацией и обеспечением санитарно-гигиенических требований.

### 3.7.5 Подготовительный период

Для циклически работающих морозильных аппаратов тепловая нагрузка, возникающая в период подготовки их к работе, может быть значительной. В промежутке между циклами замораживания происходит значительный нагрев элементов конструкции в охлаждаемом объеме аппарата (например, в результате санитарной обработки горячим раствором или во время загрузки продуктом). Элементы конструкции и изоляция имеют большую теплоемкость и, следовательно, создают значительную тепловую нагрузку.

### 3.7.6 Пиковые тепловые нагрузки

Тепловая нагрузка морозильных аппаратов периодического действия изменяется в процессе замораживания от максимального в начале до минимального значения в конце. Причем максимальное значение нагрузки превышает среднее за процесс в 2–4 раза из-за изменения температуры продукта [26]. Холодильная установка должна иметь холодопроизводительность, превышающую среднюю тепловую нагрузку и достаточную для обеспечения требуемого качества замораживаемого продукта при приемлемых затратах. Значение такого превышения холодопроизводительности зависит также от того, сколько морозильных аппаратов она одновременно обслуживает — один или несколько. Следует отметить, что холодопроизводительность установки, как правило, меньше максимального (пикового) значения тепловой нагрузки.

### 3.7.7 Уменьшение тепловой нагрузки

Уменьшение тепловой нагрузки сокращает как эксплуатационные затраты, так и требуемую холодопроизводительность холодильной установки. Обычно принимают следующие меры: оттаивание проводят при отключенной холодильной установке; понижают температуру продукта, поступающего на замораживание; уменьшают ин-



фильтрацию воздуха; защищают замороженный продукт от повышения температуры; обеспечивают такую циркуляцию воздуха, при которой уменьшается энергопотребление вентилятора.

## 3.8 Экономические аспекты

### 3.8.1 Капитальные затраты

Основными составляющими капитальных затрат на морозильные аппараты являются: корпус с изоляцией; системы транспортирования и размещения продукта (лотки, конвейеры и т. п.); испарители и вентиляторы; холодильная установка или система охлаждения и хранения криогенных веществ; системы контроля и мониторинга.

Относительные затраты на эти составляющие зависят от вида используемого морозильного аппарата. Выбор вида аппарата обычно определяется размерами имеющегося производственного помещения, видом продукта, производительностью технологической линии, желаемым уровнем автоматизации, необходимостью увязки морозильного аппарата с другими технологическими операциями и достижением рационального сочетания капитальных и эксплуатационных затрат.

На капитальные затраты влияет продолжительность замораживания и тепловая нагрузка. Продолжительность замораживания связана с временем нахождения продукта в морозильном аппарате, поэтому определяет его габаритные размеры и технологию обработки продукта.

Значение тепловой нагрузки влияет главным образом на капитальные затраты, связанные с холодильной системой морозильного аппарата. Требуемая мощность холодильной установки зависит от условий эксплуатации (в частности, от температуры охлаждающей среды) и продолжительности замораживания. Иногда тепловую нагрузку можно уменьшить за счет увеличения капитальных затрат (например, для плиточных морозильных аппаратов не нужны вентиляторы). Это влияет как на капитальные затраты, связанные с холодильной установкой, так и на эксплуатационные затраты, особенно энергетический компонент.

#### 3.8.1.1 Холодопроизводительность и тип холодильной установки

Выбор конфигурации и холодопроизводительности холодильной установки морозильного аппарата имеют большое значение, так как они составляют большую долю капитальных затрат и существенно влияют на эксплуатационные затраты. Если холодильная установка обслуживает один морозильный аппарат, то это дает некоторую гибкость, поскольку работа с данным агрегатом не зависит от работы других потребителей холода.

Однако по сравнению с холодильной установкой, обслуживающей нескольких потребителей, установка, обслуживающая один аппарат, может потребовать дублирования средств контроля и дополнительного оборудования. В этом случае выгода от уменьшения холодопроизводительности и разделения распределения нагрузки может оказаться незначительной.

Холодильная установка может работать на различных хладагентах и иметь различные конфигурации, например, быть одноступенчатой или двухступенчатой, непосредственного или косвенного охлаждения, с насосной или безнасосной подачей хладагента. Ни один из существующих хладагентов не имеет особых термодинамических преимуществ, поэтому при его выборе руководствуются безопасностью работы холодильной установки и затратами. Данные о разрушении озонового слоя Земли вызвали быструю замену традиционных хладагентов, используемых в морозильных аппаратах, на озонобезопасные.

Современные холодильные установки морозильных аппаратов работают на хладагентах R717, R404A, R410A, R507, R134a, совершенствуются установки, работающие на диоксиде углерода и воздухе. По-прежнему применяются хладагенты на основе гидрохлорфторуглеродов, например R22 и смеси таких хладагентов, но в ближайшем будущем их производство должно прекратиться. Пока эксплуатируются холодильные установки на хлорфторуглеродах R12 и R502, производство которых прекращено в начале 90-х годов. На крупных многоцелевых предприятиях целесообразно применять аммиачные холодильные установки двухступенчатого сжатия с насосной подачей жидкого хладагента. На специализированных и небольших предприятиях желательно использовать холодильные установки, работающие на гидрохлорфторуглеродах или гидрофторуглеродах, одноступенчатого сжатия и (или) непосредственного охлаждения. Ниже рассмотрим влияние конструкции холодильных установок и условий их эксплуатации на холодопроизводительность и капитальные затраты на них.

### 3.8.1.2 Испарители и вентиляторы

Змеевики испарителей в основном имеют пластинчатое оребрение. Вентиляторы могут быть как частью конструкции испарителя, называемого воздухоохладителем, так и располагаться отдельно. Воздухоохладители обеспечивают отвод теплоты от воздуха, циркулирующего в аппарате, и подачу необходимого количества воздуха к продукту.

Выбор производительности воздухоохладителя зависит от требуемой подачи воздуха, которая должна быть согласована со скоростью движения воздуха у продукта.

Важную роль играет отношение площади поверхности змеевиков к площади поперечного сечения канала в области расположения продукта.

Скорость движения воздуха в испарителе обычно составляет от 2,5 до 6 м/с. Стандартный шаг ребер — от 6,3 до 8,5 мм, но для условий интенсивного инсообразования шаг ребер может быть увеличен. Шаг ребер может быть переменным, что способствует уменьшению влияния инея на производительность испарителя. Затраты на испаритель относительно низкие, и поэтому окончательный его выбор часто зависит от размещения в конкретном морозильном аппарате и получения необходимой подачи воздуха (как и при учете теплопередачи).

Важно также иметь в виду, что подача воздуха должна быть достаточно большой, чтобы снизить его нагрев в аппарате, хотя при встречном движении продукта и воздуха возможен большой нагрев последнего. Для других типов взаимного движения продукта и воздуха определяющим фактором при проектировании аппарата является скорость замораживания продукта в месте наибольшего нагрева — перед поступ-





лением в испаритель. Как правило, чем больше нагрев воздуха, тем ниже температура кипения  $\theta_e$  при одинаковой температуре воздуха, входящего в испаритель  $\theta_{on}$ , но меньше энергопотребление вентилятора. Обычно нагрев воздуха в морозильных аппаратах с поперечным движением воздуха составляет менее 4 К. В специально созданных аппаратах с эффективным противоточным движением продукта и воздуха (например, в вертикальных спиральных аппаратах) нагрев воздуха может составлять до 10 К, что требует особой конструкции вентиляторов и испарителя.

Обычно испарители рассчитываются исходя из отвода ощутимой теплоты при заданной скорости движения воздуха и разности температур  $TD$  между хладагентом и температурой входящего воздуха.

$$\phi_{tot} = UA_{on} (\theta_{on} - \theta_e) = Q_a \rho_a c_a (\theta_{on} - \theta_{off}). \quad (3.45)$$

Разность температур между воздухом и хладагентом может быть среднелогарифмической, но в этом случае значение  $UA$  будет выше. В испарителе передается и скрытая теплота при образовании инея на поверхности змеевиков. Доля скрытой теплоты, передаваемой в испарителе, обычно мала и не учитывается. Однако образование инея оказывает существенное влияние на теплопередачу из-за уменьшения объемной подачи воздуха и значения  $UA_{on}$ .

Следует иметь в виду, что значения коэффициента теплопередачи испарителя и объемной подачи воздуха обычно даются с учетом инеобразования, а также разности температур (среднеарифметическая или среднелогарифмическая), используемой в расчетах. Зависимость качества испарителя от скорости движения обычно описывается зависимостью

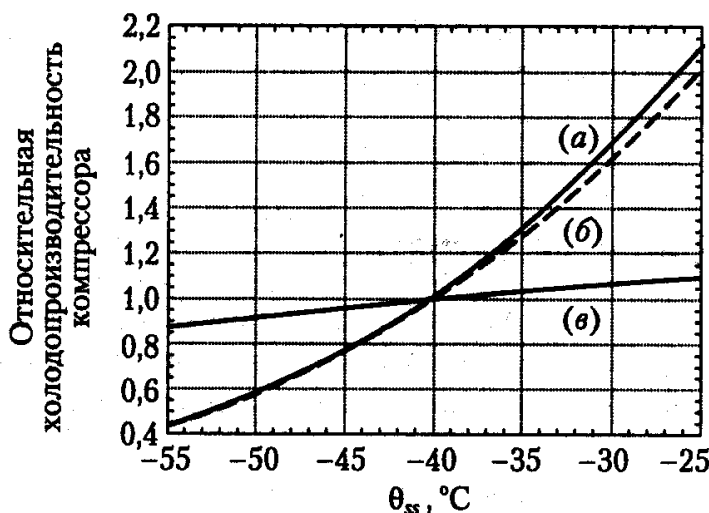
$$UA_{on} = \alpha u_a^{0,5-0,6}. \quad (3.46)$$

На качество испарителя оказывает влияние способ подачи хладагента. Так, при верхней подаче оно обычно на 10–15% ниже, чем при нижней, а при безнасосной подаче ниже, чем при насосной. Обычно для испарителей рекомендуется разность температур  $TD$  от 5 до 10 К, так как при небольшой разности температур возрастают затраты на испаритель, а при большой разности — на энергию (из-за более низких температур  $\theta_e$  при большой разности температур).

### 3.8.1.3 Компрессоры, конденсаторы и другое оборудование

Компрессоры, конденсаторы и другое оборудование холодильной установки (насосы, вентиляторы, аппараты, трубопроводы, системы управления и т. п.) требуют значительных капитальных затрат; некоторое оборудование потребляет энергию. Большая часть холодильного оборудования выбирается в зависимости от их производительности (холодопроизводительности, теплового потока, объемной подачи) при определенных температурах (давлениях) всасывания и нагнетания.

На рис. 3.10 представлена относительная холодопроизводительность одно- и двухступенчатых компрессоров при различных насыщенных температурах всасывания. Для двухступенчатых компрессоров даны два графика — для компрессора сту-



**Рис. 3.10.** Влияние насыщенной температуры всасывания  $\theta_{ss}$  на относительную холодопроизводительность компрессоров (отнесенную к холодопроизводительности при  $\theta_{ss} = -40^\circ\text{C}$ ) типичной холодильной установки: а) одноступенчатых; б) бустерных; в) высокой степени давления

пени низкого давления (бустерного компрессора) и компрессора высокой степени давления. Предполагается, что состояние пара, всасываемого в компрессор высокой степени давления, не изменяется. Влияние состояния пара, всасываемого в компрессор низкой степени давления, на производительность компрессора высокой степени давления зависит от типа компрессора низкой степени давления и типа системы его охлаждения. Если бустерный компрессор не охлаждается внешней системой, то производительность компрессора высокой степени давления меньше, чем показано на графике.

Влияние температуры конденсации на холодопроизводительность значительно меньше. Производительность одноступенчатых компрессоров и компрессоров высокой степени давления уменьшается приблизительно на 1% при повышении температуры конденсации на  $1^\circ\text{C}$ .

Насыщенные температуры всасывания и нагнетания отличаются от температур кипения и конденсации из-за падения давления во всасывающем и нагнетательном в трубопроводах. Обычно полагают, что перепады давления составляют от  $0,5$  до  $3^\circ\text{C}$  в температурном эквиваленте для всасывающего и нагнетательного трубопроводов.

Падение давления нежелательно при эксплуатации морозильного аппарата в условиях, отличных от расчетных. Для стационарного трубопровода падение давления во всасывающем трубопроводе при постоянной тепловой нагрузке возрастает при уменьшении  $\theta_e$ . Основной причиной этого является увеличение скорости пара из-за уменьшения его плотности при более низком давлении всасывания. Можно считать, что уменьшение  $\theta_e$  на  $1^\circ\text{C}$  увеличивает падение давления примерно на 7% [11]:

$$\Delta P_2 = \Delta P_1 1,07^{(\theta_{e1} - \theta_{e2})}. \quad (3.47)$$

Аналогично по мере увеличения тепловой нагрузки увеличивается падение давления вследствие увеличения массового расхода:

$$\Delta P = \alpha \phi_{tot}^{1,8}. \quad (3.48)$$

## 3.8.2 Эксплуатационные затраты

Основные эксплуатационные затраты на холодильную установку включают расходы на техническое обслуживание и рабочую силу; энергию для вентилятора и холодильной установки; расходуемое криогенное вещество; потерю массы продукта вследствие усушки.

Что касается капитальных затрат, то их доля зависит от типа морозильного аппарата, степени автоматизации и т. п. После выбора вида морозильного аппарата основными факторами, влияющими на энергозатраты и потерю массы продукта, являются условия его эксплуатации. Условия эксплуатации также влияют на то, будет ли достигнуто полное замораживание продукта и, следовательно, косвенно влияют на его качество.

Тепловая нагрузка, если рассматривать ее с точки зрения эксплуатационных затрат, в основном влияет на количество энергии, потребляемой холодильной установкой, или на расход криогенного вещества. Продолжительность замораживания и условия эксплуатации существенно влияют на потребление энергии.

### 3.8.2.1 Потребление энергии

Основными потребителями энергии в холодильных установках являются компрессоры и вентиляторы, а также вспомогательное оборудование: насосы для подачи воды, хладоносителя и хладагента; вентиляторы градирни и конденсатора; масляные насосы; системы регулирования и т. д. Как правило, энергопотребление вспомогательного оборудования составляет 10–15% энергопотребления компрессора, и его следует учитывать при расчете энергетических затрат. Энергопотребление насосов и вентиляторов рассчитывается по формуле (3.43). Зависимость между тепловой нагрузкой (холодопроизводительностью) и энергопотреблением компрессора выражается уравнением

$$\phi_{comp} = \phi_{tot} / \text{ХК} \quad (3.49)$$

*Холодильный коэффициент* ХК — это отношение холодопроизводительности к потребленной компрессором энергии. На рис. 3.11 приведены зависимости ХК компрессоров от насыщенных температур всасывания и нагнетания.

Для крупных морозильных аппаратов обычно применяют двухступенчатые компрессоры и на каждой ступени сжатия часто используются несколько компрессоров. Для небольших же морозильных аппаратов использование двухступенчатых компрессоров зачастую оказываются экономически неоправданным. При использовании компрессоров с экономайзером энергопотребление составляет среднее значение между энергопотреблением вариантов с одно- и двухступенчатыми компрессорами. Относительно простые методы расчета энергопотребления компрессора как функции условий эксплуатации систем с холодильных установок приведены в работах [10, 11].

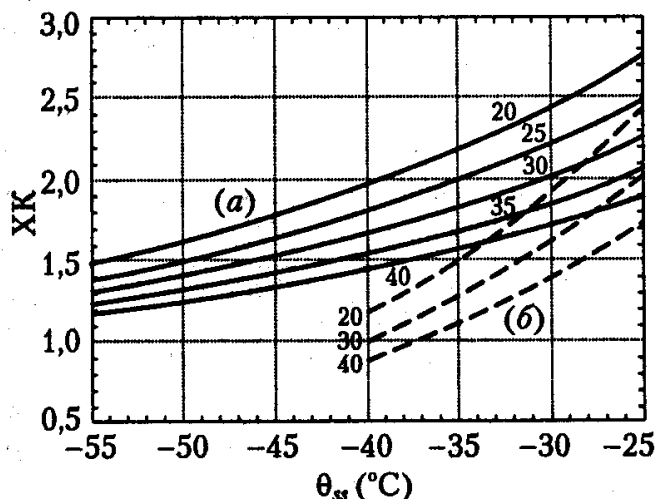


Рис. 3.11. Влияние насыщенной температуры всасывания  $\theta_{ss}$  и температуры конденсации на ХК компрессоров: а) двухступенчатых; б) одноступенчатых

### 3.8.2.2 Расход криогенного вещества

Для криогенного морозильного аппарата основные эксплуатационные затраты связаны с расходом криогенного вещества, который определяется зависимостью:

$$m_r = \frac{\Phi_{tot}}{H_{out} - H_{in}} \quad (3.50)$$

Данные, необходимые для расчета энтальпий  $H_{out}$  и  $H_{in}$  для азота и диоксида углерода в зависимости от давления и температуры приведены в табл. 3.6. Более полные сведения о различных криогенных веществах приведены в работе [2].

### 3.8.2.3 Потеря массы продукта вследствие усушки

Потеря массы продукта (усушка) вследствие испарения влаги с его поверхности в процессе замораживания влечет за собой как существенные затраты (уменьшается масса продукта, поступающего в продажу), так и потерю качества (из-за обезвоживания продукта). Кроме того, интенсивное образование инея в испарителе увеличивает эксплуатационные затраты, поскольку возникает необходимость в его оттаивании для восстановления производительности испарителя.

Потеря массы связана с массоопередачей. Основное уравнение, описывающее потерю массы, имеет вид

$$\frac{dW}{dt} = \int K(p_s - p_a) dA \quad (3.51)$$

Коэффициент массоопередачи  $K$  включает сопротивление упаковки и поверхностного слоя данного продукта (например, кожи или жира); сопротивление, связанное с переходом молекул воды из твердой или жидкой фазы в газообразное состояние; сопротивление пограничного слоя воздуха. В обычных условиях работы морозильных

Таблица 3.6. Энтальпии криогенных веществ

Азот			Диоксид углерод		
Давление, МПа	Температура, °С	Энтальпия, кДж/кг	Давление, МПа	Температура, °С	Энтальпия, кДж/кг
0,1	27,0	462,1	0,1	37,8	405,2
0,1	-23,0	410,1	0,1	10,0	380,9
0,1	-73,0	358,0	0,1	-17,8	367,6
0,1	-123,0	305,8	0,1	-45,6	334,8
0,1	-173,0	253,0	0,1	-59,4	323,3
0,1	-195,8	228,7	0,1	-78,6	310,3
0,1	-195,8	29,4	0,511	-56,6	-31,9
0,135	-193,3	34,8	0,645	-51,1	-21,2
0,226	-188,0	45,2	0,805	-45,6	-10,7
0,355	-183,0	55,7	0,990	-40,0	0,0
0,533	-178,0	66,4	1,47	-28,9	21,4
0,767	-173,0	77,7	2,08	-17,8	43,7
1,07	-168,0	89,7	2,87	-6,7	68,8
1,45	-163,0	102,4	3,86	4,4	97,2
1,91	-158,0	116,2	5,09	15,6	129,6
2,49	-153,0	131,7	6,59	26,7	172,1
3,17	-148,0	154,6	7,30	31,1	225,9
3,35	-147,1	182,0			

аппаратов сопротивление пограничного слоя воздуха значительно меньше других сопротивлений. Сопротивление упаковочного материала обычно велико, поэтому упаковка существенно сокращает потерю массы продукта.

Сложности определения  $\theta_s$  и, следовательно,  $p_s$  как функций времени и местоположения на поверхности продукта, а также расчета  $K$  приводят к тому, что применение уравнения (3.51) для расчета потери массы в процессе замораживания затруднительно без экспериментальных данных и вычислительной техники. Формула для расчета максимальных потерь массы в процессе замораживания приведена в [39].

Можно установить только ряд общих принципов сокращения потери массы продуктов. Любые меры, принятые для уменьшения температуры  $\theta_s$  и, следовательно, парциального давления  $p_s$ , вызовут значительное сокращение потери массы, например, понижение температуры  $\theta_a$ , но при этом увеличиваются затраты на энергию, потребляемую морозильным аппаратом. При возрастании скорости движения воздуха увеличивается  $h$ , а значит быстрее уменьшается  $\theta_s$ . Но с ростом скорости движения воздуха увеличиваются  $K$ , интенсивность потери массы и энергопотребление вентилятора. Однако итоговый результат может быть положительным. Увеличение относительной влажности воздуха оказывает незначительное влияние на уменьшение потери массы в процессе замораживания. Для сокращения потери массы про-



дукта можно понижать начальную температуру продукта, так как это сокращает время процесса замораживания, в течение которого действуют силы, обуславливающие потерю массы. В общем, чем быстрее процесс замораживания, тем меньше потеря массы продукта.

Обычно для неупакованных продуктов потери массы составляют: от 0,1 до 1% — при криогенном замораживании; от 0,5 до 2,5% — при замораживании продуктов больших размеров и от 1,5 до 5% — при замораживании продуктов небольшого размера в морозильных аппаратах с интенсивной циркуляцией воздуха. Основная причина, обуславливающая меньшую потерю массы продуктов в криогенных холодильных аппаратах по сравнению с аппаратами с интенсивным движением воздуха, — это более быстрое уменьшение значения  $\theta_s$ . Хотя более высокие температуры продукта на выходе уменьшают расход криогенного вещества, время замораживания увеличивается и возрастает потеря массы продукта.

## 3.9 Примеры расчетов

### 3.9.1 Пример 1: Определение коэффициента формы $E$ для ограниченного цилиндра

Початки кукурузы заморожены таким образом, что  $Bi = 0,5$ . Диаметр каждого початка равен примерно 60 мм, а длина — около 100 мм. Определить коэффициент формы  $E$  початка кукурузы.

Термический центр расположен в геометрическом центре початка. Полутолщина, равная половине диаметра, составляет  $R = 0,06/2 = 0,03$  м. Наименьшее поперечное сечение имеет форму круга, а площадь поперечного сечения и общий объем рассчитываются по известным формулам

$$A = \pi \cdot 0,03^2 = 2,827 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2; \quad V = \pi \cdot 0,03^2 \cdot 0,1 = 2,827 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3.$$

Из формул (3.12) и (3.13) следует, что

$$\beta_1 = 2,827 \cdot 10^{-3} / (\pi \cdot 0,03^2) = 1,0, \quad \beta_2 = 3 \cdot 2,827 \cdot 10^{-4} / (4\pi \cdot 1,0 \cdot 0,03^3) = 2,5.$$

Значение  $E$  находят по уравнению (3.11):

$$E = 1 + \frac{1 + \frac{2}{0,5}}{1,0^2 + \frac{2 \cdot 1,0}{0,5}} + \frac{1 + \frac{2}{0,5}}{2,5^2 + \frac{2 \cdot 2,5}{0,5}} = 1 + 1 + 0,308 = 2,31.$$

### 3.9.2 Пример 2: Определение теплофизических свойств рыбного филе в картонной коробке

Блок рыбного филе размерами  $58 \times 330 \times 650$  мм, массой 10,2 кг упакован в картонную коробку. Известно, что в рыбе содержится 76% воды и 6,5% жира, а ее температура начала заморозания составляет  $-1,7$  °С. Каковы теплофизические свойства рыбного филе?

Используем метод, описанный в п. 3.5. Тогда по известным значениям  $\theta_{if} = -1,7$  °С,  $X_W = 0,760$ ,  $X_F = 0,065$  находим по формуле (3.15)  $X_s = 1 - 0,76 - 0,065 = 0,175$ .

Из табл. 3.2 для рыбных продуктов выбираем среднее значение  $b = 0,23$ . Доля связанной воды определяется по формуле (3.23):  $X_B = 0,23 \cdot 0,175 = 0,040$ .

Долю вымороженной воды рассчитываем по формуле (3.22) при  $\theta = -25$  °С.

$$X_I = (0,760 - 0,040) \left( 1 - \frac{-1,7}{-25} \right) = 0,671.$$

По уравнению (3.17) находим  $X_{LW} = 0,76 - 0,671 - 0,040 = 0,049$ .

Для расчета плотности замороженного материала ( $\rho_{\epsilon=0}$ ) используем формулу (3.24) и плотности отдельных компонентов (см. табл. 3.3).

$$\frac{1}{\rho_{\epsilon=0}} = \frac{0,671}{917} + \frac{0,049}{1000} + \frac{0,04}{1000} + \frac{0,065}{930} + \frac{0,175}{1450}; \quad \rho_{\epsilon=0} = 989 \text{ кг/м}^3.$$

Картонная коробка содержит значительное число заполненных воздухом пустот. Как известно, между рыбой и картонной коробкой есть зазоры. Полагаем, что они влияют на коэффициент теплопередачи, а не на теплофизические свойства блока рыбного филе. Следовательно, фактические размеры блока рыбного филе будут меньше, чем внутренние размеры картонной коробки.

Допустим, что среднее значение воздушного зазора у верхней и боковых поверхностей равна 2 мм. Тогда можно найти:

- объем блока рыбного филе массой  $M = 10,2$  кг

$$V = (0,058 - 0,002) \cdot (0,330 - 2 \cdot 0,002) \cdot (0,650 - 2 \cdot 0,002) = 0,01173 \text{ м}^3;$$

- пористость по формуле (3.18)

$$\epsilon = 1 - \frac{10,2}{0,01179 \cdot 989} = 0,125;$$

- плотность по формуле (3.25)

$$\rho = (1 - 0,125) \cdot 989 = 865 \text{ кг/м}^3.$$

Удельная теплоемкость рыбного филе определяется с учетом массовых долей компонентов и их плотности (см. табл. 3.3) по формуле (3.26):

$$c_f = 0,671 \cdot 2110 + (0,049 + 0,040) \cdot 4180 + 0,065 \cdot 1900 + 0,175 \cdot 1600 = 2191 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Удельная теплоемкость незамороженной части продукта рассчитывается с использованием массовых долей, полученных по уравнению (3.26):

$$c_u = (0,76 \cdot 4180) + (0,065 \cdot 1900) + (0,175 \cdot 1600) = 3580 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Объемные доли замороженной части рассчитываем по формуле (3.31):

$$v_I = \frac{989 \cdot 0,671}{917} = 0,724; \quad v_S = \frac{989 \cdot 0,175}{1450} = 0,119; \quad v_F = \frac{989 \cdot 0,065}{930} = 0,069;$$

$$v_{LW} = \frac{989 \cdot 0,049}{1000} = 0,048; \quad v_B = \frac{989 \cdot 0,040}{1000} = 0,040.$$

Теплопроводность незамороженной части блока находим, используя данные по теплопроводности компонентов (см. табл. 3.3) и уравнение (3.33):

$$\frac{1}{k_{f,\varepsilon=0}} = \frac{0,048 + 0,040}{0,56} + \frac{(1 - 0,048 - 0,040)^2}{0,724 \cdot 2,22 + 0,119 \cdot 0,22 + 0,069 \cdot 0,18};$$

$$k_{f,\varepsilon=0} = 1,509 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

Теплопроводность с учетом пористости продукта и  $k_a = 0,025 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$  (см. табл. 3.3) рассчитываем по уравнению (3.34):

$$k_f = 1,509 \left[ \frac{2 \cdot 1,509 + 0,025 - 2 \cdot 0,125 \cdot (1,509 - 0,025)}{2 \cdot 1,509 + 0,025 + 0,125 \cdot (1,509 - 0,025)} \right] = 1,25 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

Скрытую теплоту замерзания полностью замороженного филе при  $L' = 334 \times 10^3 \text{ Дж/кг}$  и значениях  $X_1 = 0,671$  найдем по уравнению (3.30):

$$L = 0,671 \cdot 334 \cdot 10^3 = 224,1 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}.$$

### 3.9.3 Пример 3: Расчет коэффициента теплопередачи при замораживании блоков рыбного филе в морозильном аппарате с интенсивной циркуляцией воздуха

Блоки рыбного филе, упакованные в картонные коробки, характеристики которых приведены в примере 2, замораживаются в морозильном аппарате в потоке воздуха, который обдувает их со скоростью 2 м/с. Упаковка представляет собой коробку из гофрированного картона толщиной 1,8 мм, проложенную двумя слоями полиэтилена низкой плотности толщиной 0,2 мм. Крышка и дно коробки выполнены из одного слоя картона, а боковые стороны — трехслойные.

Надо определить коэффициент теплопередачи такой картонной коробки с учетом воздушного зазора толщиной 2 мм между поверхностью блока и всеми поверхностями коробки, кроме ее дна.



Почти каждая из поверхностей коробки имеет свое значение  $h$ . В этом случае при расчете можно принять среднее значение толщины картона и воздушного зазора или найти среднее значение  $h$  для коробки. Поскольку в первом варианте потребуется меньше расчетов, то применим именно этот метод. Площадь поверхности верхней грани коробки и ее дна составляют 79% от всей площади поверхности коробки, так как эти грани расположены ближе остальных к геометрическому центру продукта. Выбор доли площади, приходящейся на поверхности, ближайšie к геометрическому центру продукта, основан на опыте проектирования. Боковые стороны коробки выполнены из трехслойного картона и в общем составляют половину всей площади поверхности. Следовательно, средняя толщина картона определяется как средне-взвешенная

$$x_p = \frac{0,79 \cdot 1,8 + (1 - 0,79) \cdot 3 \cdot 1,8 \cdot 0,5}{0,79 + (1 - 0,79) \cdot 0,5} = 2,2 \text{ мм.}$$

Аналогично определяется средний воздушный зазор (с учетом того, что между дном коробки и продуктом он отсутствует):

$$x_a = \frac{0,79 \cdot 0,5 \cdot 2,0 + 0,79 \cdot 0,5 \cdot 0 + (1 - 0,79) \cdot 2,0 \cdot 0,5}{0,79 + (1 - 0,79) \cdot 0,5} = 1,1 \text{ мм.}$$

Коэффициент теплопередачи конвекцией найдем по формуле (3.40):

$$h_c = 7,3 \cdot 2^{0,8} = 12,7 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Термическое сопротивление теплопередачи с учетом теплопроводностей гофрированного картона  $k_p = 0,048 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ , полиэтиленовой пленки  $k_p = 0,33 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$  и воздушной прослойки  $k_a = 0,025 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$  (см. табл. 3.4) рассчитаем по формуле (3.35):

$$\begin{aligned} \frac{1}{h} &= \frac{1}{12,7} + \frac{0,0022}{0,048} + \frac{2 \cdot 0,0002}{0,33} + \frac{0,0011}{0,025} \\ &= 0,0787 + 0,0458 + 0,0012 + 0,0440 = 0,1697 \text{ К/(м}^2 \cdot \text{Вт)}. \end{aligned}$$

Тогда коэффициент теплопередачи равен

$$h = 1/0,1697 = 5,9 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

В данном примере на сопротивление теплопередачи конвекцией приходится 46% общего сопротивления теплопередачи (0,0787 из 0,1697), картона — 27%, полиэтиленовой пленки — 1% и воздушного зазора — 26%. Как видно, сопротивление упаковки (картон плюс воздушный зазор) и сопротивление теплопередачи к воздуху примерно равны. Для увеличения  $h$  необходимо уменьшить термическое сопротивление, например, путем увеличения скорости движения воздуха, уменьшения толщины картона и более плотного размещения продукта в коробке для исключения воздушных зазоров.

Кроме приведенного выше расчета, в данном примере можно было бы вычислить значения  $h$  отдельно для верхней ( $x_a = 2,0$  мм) и нижней ( $x_a = 0$  мм) поверхностей с учетом усредненной толщины картона. Если термический центр (область, имеющая наиболее высокую температуру) сместить выше геометрического центра коробки, то можно получить значительно большее значение  $h$  для днища.

Время замораживания блока можно найти по формуле (3.10), а пояснения к этому методу представлены в работах [28, 40].

### 3.9.4 Пример 4: Расчет времени замораживания пиццы

Требуется определить время замораживания пиццы диаметром 23 см и средней толщиной  $2R = 1,58$  см в морозильном аппарате при скорости движения воздуха  $u_a = 3$  м/с и температуре  $\theta_a = -34$  °С от начальной температуры  $\theta_i = 15,5$  °С до конечной  $\theta_{fin} = -12$  °С.

Характеристики пиццы: теплопроводность в замороженном состоянии  $k_f = 1,5$  Вт/(м · К); плотность в замороженном состоянии  $\rho = 860$  кг/м<sup>3</sup>; удельная теплоемкость в незамороженном состоянии  $c_u = 3,3$  кДж/кг, а в замороженном  $c_f = 1,9$  кДж/кг; скрытая теплота замораживания  $L = 180$  кДж/кг; температура начала замерзания  $\theta_{if} = -2$  °С; полутолщина  $R = 0,0158/2 = 7,9 \cdot 10^{-3}$  м.

Коэффициент теплопередачи, здесь равный коэффициенту конвективной теплопередачи, может быть найден по уравнению (3.40)

$$h = h_c = 7,3 \cdot 3^{0,8} = 17,6 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Используя тот же метод расчета, что и в примере 1, найдем коэффициент формы, который равен  $E = 1,05$ . По форме пицца близка к бесконечной пластине, поэтому влияние ее кромок на теплопередачу очень мало.

Для определения времени замораживания  $t_f$  воспользуемся формулой (3.10), предварительно рассчитав

$$\theta_{fm} = 1,8 + 0,263 \cdot (-12,0) + 0,105 \cdot (-34,0) = -4,93 \text{ °С};$$

$$\Delta H_1 = 860 \cdot 3,3 \cdot 10^3 \cdot [15,5 - (-4,93)] = 57,98 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3;$$

$$\Delta \theta_1 = 0,5 \cdot [15,5 + (-4,93)] - (-34,0) = 39,28 \text{ °С};$$

$$\Delta H_2 = 860 \cdot 180 \cdot 10^3 + 860 \cdot 1,9 \cdot 10^3 \cdot [-4,93 - (-12,0)] = 166,66 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3;$$

$$\Delta \theta_2 = -4,93 - (-34,0) = 29,07 \text{ °С};$$

$$t_f = \frac{1}{1,05} \left( \frac{57,98 \cdot 10^6}{39,28} + \frac{166,66 \cdot 10^6}{29,07} \right) \left( \frac{0,0079}{17,6} + \frac{0,0079^2}{2 \cdot 1,5} \right) =$$

$$= (6,866 \cdot 10^6) (4,49 \cdot 10^{-4} + 2,08 \cdot 10^{-5}) = 3225 \text{ с} = 53,8 \text{ мин.}$$

Уравнение (3.10) рекомендуется для продукта с однородной структурой, а пицца по своему составу гетерогенная, поэтому погрешность расчета может быть значительной и желательно получить экспериментальное подтверждение полученных результатов.

### 3.9.5 Пример 5: Влияние упаковки на продолжительность замораживания

В предыдущем примере пицца замораживалась без упаковки. В такой ситуации происходит потеря массы пиццы вследствие испарения влаги и уноса воздухом вкусовых ингредиентов (сыра и мяса) и интенсивно образуется иней на поверхности змеевиков испарителя. Во избежание этих проблем пиццу можно упаковывать в термоусадочную пленку. Однако это уменьшит коэффициент конвективной теплопередачи и для сохранения требуемой производительности аппарата придется увеличить скорость движения воздуха.

Если толщина упаковочной пленки 0,3 мм, а ее теплопроводность составляет 0,3 Вт/(м · К), какова должна быть скорость движения воздуха, чтобы продолжительность замораживания составила, как в примере 4,  $t_f = 54$  мин? Общий коэффициент теплопередачи должен оставаться равным 17,6 Вт/(м<sup>2</sup> · К). Новое значение  $h_c$  может быть рассчитано по уравнению (3.35), но необходимо произвести предварительный анализ и учесть добавочное термическое сопротивление воздушного зазора между поверхностью пиццы и упаковочной пленкой. Поскольку теплопроводность воздуха 0,025 Вт/(м · К) значительно меньше, чем пленки, то определяющим будет термическое сопротивление воздушного зазора. Полагая, что средний зазор между поверхностью пиццы и пленкой составляет 0,3 мм, из уравнения (3.35)

$$\frac{1}{17,6} = \frac{1}{h_c} + \frac{0,0003}{0,3} + \frac{0,0003}{0,025}$$

получим значение коэффициента теплопередачи  $h_c = 22,8$  Вт/(м<sup>2</sup> · К), а затем из уравнения (3.40)  $h_c - 22,8 = 7,3 u_a^{0,8}$  найдем требуемую скорость движения воздуха  $u_a = 4,15$  м/с. При такой скорости относительное увеличение мощности вентилятора можно получить по уравнению (3.44):

$$\frac{\Phi_{\text{вент,нов}}}{\Phi_{\text{вент,стар}}} = \left( \frac{4,15}{3,0} \right)^{2,5} = 2,25.$$

Только сравнительный анализ экономии, получаемой в результате упаковки пиццы, с затратами на упаковочную пленку и дополнительную энергию вентилятора покажет, насколько оправдан предложенный метод.

Следует отметить, что на результаты расчета существенно влияет предполагаемый воздушный зазор. Для получения более точных данных по термическому сопротивлению воздушного зазора можно использовать экспериментальные данные, которые могут включать:

- неоднократное измерение продолжительности замораживания как в защитной пленке, так и без нее, но при одинаковых условиях;

- расчет сопротивления теплопередаче  $1/h$  из уравнения 3.10;
- расчет сопротивления теплопередаче воздушного зазора из уравнения (3.35).

### 3.9.6 Пример 6: Определение продолжительности замораживания пористых пищевых продуктов

Стандартное мороженое на 50% по объему состоит из воздуха. Оно выпускается и продается в контейнерах цилиндрической формы диаметром 11, длиной 16,5 см и вместимостью  $1,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ . Контейнер выполнен из композитного материала толщиной 1 мм с теплопроводностью  $0,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

В состав «твердых» веществ смеси входит 40% воды, 35% жира и 25% сухого обезжиренного молочного остатка. Эта смесь охлаждается и частично замораживается на внутренней поверхности теплообменника (фризера), насыщается на 50% по объему воздухом и поступает на фасовку с температурой  $-4^\circ\text{C}$ . Расфасованное в контейнеры мягкое мороженое поступает для закалки в морозильный аппарат, где обдувается воздухом с температурой  $-34^\circ\text{C}$  и скоростью движения, обеспечивающей значение  $h_c = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , в целях достижения в центре мороженого температуры  $-18^\circ\text{C}$ .

Этот пример интересен тем, что помимо рассмотрения пористого пищевого продукта в нем присутствуют еще два фактора, которые значительно усложняют возможность точного определения продолжительности замораживания. Во-первых, уравнение (3.10) рекомендуется использовать, если продукт не заморожен, в данном случае мороженое поступает в морозильный аппарат в частично замороженном состоянии с неизвестным значением этой доли, поэтому для определения продолжительности замораживания лучше всего использовать полную скрытую теплоту замораживания смесей. Это, однако, означает, что вероятнее всего полученный результат будет превышать реальное значение. Во-вторых, уравнение (3.10) было получено только для условий, в которых продукт замораживается с более высоким содержанием влаги и, следовательно, с более высокой температурой замерзания и компонентами скрытой теплоты, чем для мороженого. Точность расчетов для продуктов типа мороженого неизвестна. В целом продолжительность замораживания (затвердения) указанной смеси по уравнению (3.10) можно рассматривать только как некую ориентировочную величину.

В подобных случаях методы расчета могут быть полезнее, если они применяются для выявления относительного влияния изменений режима эксплуатационных условий, так как использование соотношений времени замораживания может привести к уменьшению погрешностей. Например, если известно, что время затвердевания составляет 2 ч при температуре  $-34^\circ\text{C}$ , то для оценки продолжительности затвердевания при температуре воздуха  $-40^\circ\text{C}$  можно было бы использовать отношение расчетных продолжительностей замораживания при  $-40$  и  $-34^\circ\text{C}$ .

Для иллюстрации приведем расчет полного времени замораживания, но следует иметь в виду указанные ограничения. Используем метод расчета, приведенный в разделе 3.5. Теплофизические свойства мороженого таковы: температура начала замерзания  $\theta_{if} = -4,0^\circ\text{C}$ ; плотность  $\rho = 1027 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; удельная теплоемкость в незамороженном



состоянии  $c_u = 2,74$  кДж/(кг · К); удельная теплоемкость в замороженном состоянии  $c_f = 2,17$  кДж/(кг · К); скрытая теплота замерзания  $L = 91,18$  кДж/кг; теплопроводность  $k_{f,\varepsilon=0} = 0,84$  Вт/(м · К).

Мороженое — это продукт, содержащий 50% по объему воздуха, поэтому его пористость составляет  $\varepsilon = 0,5$ . Для расчета коэффициента эффективной теплопроводности можно воспользоваться моделью Максвелла–Эйкена (формула (3.34)):

$$k_f = 0,84 \left[ \frac{2 \cdot 0,84 + 0,025 - 2 \cdot 0,5 \cdot (0,84 - 0,025)}{2 \cdot 0,84 + 0,025 + 0,5 \cdot (0,84 - 0,025)} \right] = 0,35 \text{ Вт/(м · К)}.$$

Плотность мороженого найдем по уравнению (3.25)

$$\rho = \rho_{\varepsilon=0}(1 - \varepsilon) = 1027 \cdot (1 - 0,5) = 519 \text{ кг/м}^3.$$

Следует учесть и влияние на теплопроводность упаковочного материала. В данном случае мороженое помещают в контейнер в полужидком виде, поэтому можно допустить, что воздушный зазор между продуктом и контейнером отсутствует. Тогда по формуле (3.35) получим

$$\frac{1}{h} = \frac{1}{20} + \frac{0,01}{0,2} = 0,05 + 0,05 = 0,1 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}; \quad h = 10 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Габаритные размеры контейнера таковы, что существенными для теплопередачи являются его стенки. Наименьший габаритный размер — это диаметр, и поэтому полутолщина составит  $R = 0,11/2 = 0,055$  м. Для получения фактора формы используем метод, описанный в пп. 3.4.4, и в результате получим  $E = 2,34$ . Наконец, по формуле (3.10) найдем:

– промежуточные значения

$$\theta_{fm} = 1,8 + 0,263 \cdot (-18,0) + 0,105 \cdot (-34,0) = -6,5^\circ \text{C};$$

$$\Delta H_1 = 519 \cdot 2,74 \cdot 10^3 \cdot [-4,0 - (-6,5)] = 3,55 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3;$$

$$\Delta \theta_1 = 0,5 \cdot [-4,0 + (-6,5)] - (-34,0) = 28,75^\circ \text{C};$$

$$\Delta H_2 = 519 \cdot 91,18 \cdot 10^3 + 519 \cdot 2,17 \cdot 10^3 \cdot [-6,5 - (-18,0)] = 60,29 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3;$$

$$\Delta \theta_2 = -6,5 - (-34,0) = 27,5^\circ \text{C}$$

– и время закалывания:

$$\begin{aligned} t_f &= \frac{1}{2,34} \left( \frac{3,55 \cdot 10^6}{28,75} + \frac{60,29 \cdot 10^6}{27,50} \right) \left( \frac{0,055}{10,0} + \frac{0,055^2}{2 \cdot 0,35} \right) = \\ &= (9,897 \cdot 10^5) (5,500 \cdot 10^{-3} + 4,321 \cdot 10^{-3}) = 9720 \text{ с} = 2,70 \text{ ч}. \end{aligned}$$



### 3.9.7 Пример 7: Сравнение воздушного и плиточного морозильных аппаратов

Рассмотрим работу воздушных и плиточных морозильных аппаратов, работающих в две смены по 8 ч и замораживающих в сутки 10 т рыбного филе от начальной температуры 10 до конечной  $-25^{\circ}\text{C}$ .

Филе упаковано в 10-килограммовые картонные коробки, как в примерах 2 и 3. В воздушном аппарате замораживание осуществляется при температуре воздуха  $-30^{\circ}\text{C}$  и скорости его движения 2 м/с, а в пластинчатом аппарате — при температуре пластин  $-30^{\circ}\text{C}$ . Необходимо определить требуемую холодопроизводительность холодильных установок и относительные затраты на потребляемую энергию.

Теплофизические свойства рыбного филе в коробках размерами  $0,056 \times 0,330 \times 0,650$  м принимаем как в примере 2:  $\rho = 865 \text{ кг/м}^3$ ;  $c_u = 3580 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$ ;  $c_f = 2191 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$ ;  $L = 224,1 \text{ кДж/кг}$ ;  $k_f = 1,25 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$  и  $\theta_{if} = -1,7^{\circ}\text{C}$ .

Для обоих аппаратов полагаем:  $\theta_a = -30^{\circ}\text{C}$ ,  $\theta_i = 10^{\circ}\text{C}$  и  $\theta_{fin} = -25^{\circ}\text{C}$ .

#### 3.9.7.1 Воздушный морозильный аппарат

Среднее значение коэффициента теплопередачи примем, как в примере 3, равным  $h = 5,9 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}$ . Наименьший размер картонной коробки — 56 мм, а между верхней стороной и продуктом имеется воздушный зазор толщиной 2 мм, снизу зазора нет. Таким образом толщина продукта составляет 0,056 м, а половина толщины  $R = 0,028$  м. Коэффициент формы  $E$  определяем по формулам (3.11)–(3.14) и данным примеров 2 и 3:

$$Bi = 5,9 \cdot 0,028 / 1,25 = 0,132; \quad V = 0,01173 \text{ м}^3;$$

$$A = 0,056 \cdot 0,326 = 0,018256 \text{ м}^2;$$

$$\beta_1 = \frac{0,018256}{\pi \cdot 0,028^2} = 7,41; \quad \beta_2 = \frac{3 \cdot 0,01179}{4\pi \cdot 7,41 \cdot 0,028^3} = 17,30;$$

$$E = 1 + \frac{1 + \frac{2}{0,132}}{7,41^2 + \frac{2 \cdot 7,41}{0,132}} + \frac{1 + \frac{2}{0,132}}{17,3^2 + \frac{2 \cdot 17,3}{0,132}} = 1 + 0,097 + 0,028 = 1,13.$$

Подставив необходимые данные в формулу (3.10), находим  $t_f$ :

$$\theta_{fm} = 1,8 + 0,263 \cdot (-25,0) + 0,105 \cdot (-30,0) = -7,93^{\circ}\text{C};$$

$$\Delta H_1 = 865 \cdot 3580 \cdot [10,0 - (-7,93)] = 55,52 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3;$$

$$\Delta\theta_1 = 0,5 \cdot [10,0 + (-7,93)] - (-30,0) = 31,04^{\circ}\text{C};$$

$$\Delta H_2 = 865 \cdot 224\,100 + 865 \cdot 2191 \cdot [-7,93 - (-25,0)] = 226,20 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3;$$

$$\Delta \theta_2 = -7,93 - (-30,0) = 22,07 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_f = \frac{1}{1,13} \left( \frac{55,52 \cdot 10^6}{31,04} + \frac{226,20 \cdot 10^6}{22,07} \right) \left( \frac{0,028}{5,9} + \frac{0,028^2}{2 \cdot 1,25} \right) = 539\,000 \text{ с} = 15,0 \text{ ч.}$$

Полагаем, что имеется два морозильных аппарата, вмещающих по 500 коробок с рыбным филе (половину суточной производительности) и работающих периодически. Продолжительность цикла замораживания составляет 16 ч. Следовательно, холодопроизводительность холодильной установки каждого аппарата определяется, исходя из 16 ч непрерывной работы.

По уравнению (3.42) можно рассчитать тепловую нагрузку от продукта для каждой холодильной установки периодического действия, но сначала следует определить среднюю объемную температуру филе в конце процесса замораживания  $\theta_{out}$ . Значение  $\theta_{out}$  будет находиться между конечной температурой центра ( $-25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и температурой воздуха ( $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ ), а для простоты рассчитываем ее как среднее арифметическое значение этих температур:  $\theta_{out} = [-25,0 + (-30,0)]/2 = -27,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Определим тепловую нагрузку при  $W_{pr} = 5000 \text{ кг}$  и  $t_{pr} = 16 \text{ ч} = 57\,600 \text{ с}$ :

$$\phi_{pr} = \frac{5000 \cdot \{3580 \cdot [10,0 - (-1,7)] + 224\,100 + 2191 \cdot [-1,7 - (-27,5)]\}}{57\,600 \cdot 1000} = 28,0 \text{ кВт.}$$

Для упрощения расчета другие виды тепловой нагрузки детально не рассчитывались, а принимались. Мощность вентилятора принимаем равной 20% от общей тепловой нагрузки, а другие виды тепловые нагрузки — 15% от общей, что соответствует данным, приведенным в табл. 3.5. Тепловая нагрузка от продукта составляет 65% от общей нагрузки, так что общая средняя нагрузка для двух холодильных установок периодического действия и мощность вентилятора может быть рассчитана как

$$\phi_{tot} = (2 \cdot 28,0)/0,65 = 86,2 \text{ кВт}; \quad \phi_{fan} = \phi_{tot} \cdot 0,2 = 86,2 \cdot 0,2 = 17,2 \text{ кВт.}$$

Тепловая нагрузка определена. Теперь определим режим работы холодильной установки. Для таких холодильных установок обычно считают, что температура воздуха в аппарате выше температуры кипения на 8 К, а падение давления во всасывающем трубопроводе эквивалентно понижению температуры кипения на  $2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Следовательно, если температура воздуха  $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ , то температура кипения —  $\theta_e = -38 \text{ }^\circ\text{C}$ , а температура пара, поступающего в компрессор,  $\theta_{ss} = -40 \text{ }^\circ\text{C}$ . Задавшись температурой конденсации  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  и зная  $\theta_{ss} = -40 \text{ }^\circ\text{C}$ , для двухступенчатой холодильной установки находим с помощью рис. 3.11 ХК холодильного компрессора, который равен 1,53. Тогда можно определить энергопотребление компрессоров по уравнению (3.49):

$$\phi_{comp} = \frac{86,2}{1,53} = 56,3 \text{ кВт.}$$

Энергопотребление вспомогательных устройств (насосы и т. п.) может составить 8,4 кВт (15% от  $\phi_{comp}$ ), так что суммарное энергопотребление (компрессоры, вспомогательные устройства и вентиляторы) составит  $56,3 + 8,4 + 17,2 = 81,9$  кВт.

### 3.9.7.2 Плиточный морозильный аппарат

Теплопередача в плиточном морозильном аппарате осуществляется только на двух больших поверхностях, поэтому принимаем  $E = 1$ . Толщина блока рыбного филе составляет 56 мм, таким же является расстояние между плитами, ограничивающими сближение плит. В результате картонная коробка будет слегка смята, чтобы исключить воздушный зазор в верхней части коробки. Тем не менее контактное термическое сопротивление может быть значительным. В этом случае принимаем  $h_c = 100$  Вт/(м<sup>2</sup> · К) (см. 3.6.1). Охлаждающие плиты контактируют с однослойным картоном толщиной 1,8 мм и двумя слоями пленки. По данным примера и уравнению (3.35) получим:

$$\frac{1}{h} = \frac{1}{100} + \frac{0,0018}{0,048} + \frac{2 \cdot 0,0002}{0,33} = 0,0487 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}; \quad h = 20,5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

По сравнению с воздушным морозильным аппаратом здесь изменились только значения  $E$  и  $h$ . Время замораживания рыбного филе определяем по формуле (3.10):

$$t_f = \frac{1}{1,0} \left( \frac{55,52 \cdot 10^6}{31,04} + \frac{226,20 \cdot 10^6}{22,07} \right) \left( \frac{0,028}{20,5} + \frac{0,028^2}{2 \cdot 1,25} \right) = 20\,200 \text{ с} = 5,6 \text{ ч}.$$

При такой продолжительности замораживания один морозильный аппарат, вмещающий 500 коробок рыбного филе, за два 8-часовых рабочих цикла заморозит требуемую массу рыбного филе. Для упрощения будем считать, что тепловая нагрузка от продукта в течение 16 ч работы плиточного аппарата аналогична воздушному аппарату. Предполагая, что прочие нагрузки составляют 10% от общей тепловой нагрузки (то есть нагрузка на продукт составляет 90% от общей тепловой нагрузки, см. табл. 3.5), получим:

$$\phi_{tot} = 2 \cdot 28,0 / 0,9 = 62,2 \text{ кВт}.$$

При работе плиточного аппарата температура кипения хладагента практически равна температуре поверхности плиты, то есть  $\theta_e = -30$  °С, а температура пара, поступающего в компрессор, на 2 К ниже из-за падения давления во всасывающем трубопроводе, т. е.  $\theta_{ss} = -32$  °С.

Для температуры конденсации 35 °С и  $\theta_{ss} = -32$  °С для двухступенчатой холодильной установки находим с помощью рис. 3.11 ХК холодильного компрессора, который равен 1,79. Тогда можно определить энергопотребление компрессоров по уравнению (3.49):

$$\phi_{comp} = \frac{62,2}{1,79} = 34,7 \text{ кВт}.$$



Таблица 3.7. Характеристики воздушных и плиточных морозильных аппаратов

Характеристики	Воздушный аппарат	Плиточный аппарат
$t_f$ , ч	15,0	5,6
$\Phi_{ne}$ , кВт за 16 ч	86,2	62,2
Энергопотребление, кВт	81,9	39,9
$\theta_e$ , °C	-38	-30
$\theta_{ss}$ , °C	-40	-32
Относительная производительность компрессора при проектных условиях эксплуатации (рис. 3.10)	1,0 (ступень низкого давления) 1,0 (ступень высокого давления)	1,50 (ступень низкого давления) 1,07 (ступень высокого давления)
Требуемые относительные габариты установленного компрессора	1,0 (ступень низкого давления) 1,0 (ступень высокого давления)	0,50 (ступень низкого давления) 0,67 (ступень высокого давления)
Вместимость аппарата (коробок)	1000	500

Приняв, что энергопотребление вспомогательных устройств составляет 15% от  $\Phi_{comp}$ , получим 5,2 кВт. Следовательно, общее энергопотребление (компрессоры, вспомогательные устройства, вентиляторы) будет равно  $34,7 + 5,2 + 0 = 39,9$  кВт.

### 3.9.7.3 Сравнение вариантов

Сводные характеристики рассмотренных выше типов холодильных установок представлены в табл. 3.7. Пластиначатый холодильник должен справляться только с 72% тепловой нагрузки и работать при более высоком  $\theta_{ss}$ , тогда как те же самые компрессоры на ступенях низкого и высокого давления будут иметь производительность соответственно на 50 и 7% большую, чем у аппаратов с циркуляцией воздуха (см. рис. 3.10). В результате чистый эффект от компрессоров низкой и высокой ступени пластиначатых холодильников должен составить 50% ( $0,72/1,5 = 0,50$ ) и 67% ( $0,72/1,07 = 0,67$ ) соответственно по сравнению с компрессорами, необходимыми для аппаратов с циркуляцией воздуха. Энергопотребление пластиначатого аппарата составит около 50% от энергопотребления аппарата с циркуляцией воздуха. Сравнивая экономию энергии и капитальные затраты в этих двух типах холодильных установок, необходимо учитывать дополнительные капитальные затраты, требуемые для пластиначатых холодильников. Также может оказаться важной более правильная форма коробок, получаемая в пластиначатых холодильных агрегатах.

### 3.9.8 Пример 8: Влияние скорости движения воздуха на продолжительность замораживания и энергопотребление

Влияние скорости движения воздуха на продолжительность замораживания и энергопотребление рассмотрим на примере воздушного морозильного аппарата с цирку-

ляцией воздуха из примера 7. Если бы время замораживания не превышало  $t_f$  12 ч, то было бы достаточно одного морозильного аппарата, вмещающего 500 коробок.

Допустим скорость движения воздуха увеличена до  $u_a = 3$  м/с (на 50%). Тогда коэффициент теплопередачи конвекцией по уравнению (3.40) будет  $h_c = 7,3 \cdot 3^{0,8} = 17,6$  Вт/(м<sup>2</sup> · К), а общий коэффициент теплопередачи составит  $h = 6,8$  Вт/(м<sup>2</sup> · К). Рост  $h$  очень невелик, так как упаковка и воздушные зазоры обладают большим термическим сопротивлением. Коэффициент формы и число Био изменятся незначительно: —  $E = 1,12$ ;  $Bi = 0,152$ . Подставив их в уравнение (3.10) с неизменными значениями  $\Delta H_1$ ,  $\Delta \theta_1$ ,  $\Delta H_2$  и  $\Delta \theta_2$  из примера 7, получим:

$$t_f = \frac{1}{1,12 \cdot 3600} \left( \frac{55,52 \cdot 10^6}{31,04} + \frac{226,20 \cdot 10^6}{22,07} \right) \left( \frac{0,028}{6,8} + \frac{0,028^2}{2 \cdot 1,25} \right) = 13,2 \text{ ч.}$$

Предположив, что используется та же схема циркуляции воздуха, новая мощность вентилятора рассчитывается по формуле (3.44) с показателем степени 2,5:

$$\phi_{fan} = 17,2 \cdot \left( \frac{3}{2} \right)^{2,5} = 47,4 \text{ кВт.}$$

Такого изменения  $t_f$  недостаточно для снижения требуемой производительности холодильной установки, пока не будет увеличена температура продукта на выходе. Если приемлемой является  $\theta_{fin} = -15$  °С, то  $t_f$  могла бы уменьшиться до 11,7 ч при скорости  $u_a = 3$  м/с, и можно было бы обеспечить два 12-часовых цикла на одной установке. В этом случае можно рассчитать среднюю тепловую нагрузку от продукта в течение суток. Снова получаем значение средней температуры массы продукта на выходе как среднее значение конечной температуры в центре продукта и температуры воздуха:

$$t_{pr} = 24 \text{ ч} = 86\,400 \text{ с}; \quad \theta_{out} = [-15,0 + (-30,0)]/2 = -22,5 \text{ °С};$$

$$\phi_{pr} = \frac{10\,000 \cdot \{3580 \cdot [10,0 - (-1,7)] + 224\,100 + 2191 \cdot [-1,7 - (-22,5)]\}}{86\,400 \cdot 1000} = 36,1 \text{ кВт.}$$

Для каждой установки, работающей в режиме 16-часового цикла, прочие нагрузки составляют 6,5 кВт (15% от общей нагрузки 43,1 кВт для каждого аппарата). Допустив, что прочие нагрузки для установок с большей скоростью воздушного потока по значению аналогичны, новая полная тепловая нагрузка будет равна

$$\phi_{tot} = 36,1 + 47,4 + 6,5 = 90,0 \text{ кВт.}$$

На вентиляторы теперь приходится 53% от общей нагрузки. Средняя тепловая нагрузка увеличилась только на 4%, но она распространяется теперь на 24 ч вместо 16 ч.

Производительность испарителя возрастет при увеличении в нем скорости движения воздуха. Для аппарата с той же схемой движения воздуха скорость движения воздуха в испарителе будет увеличиваться пропорционально скорости движения воздуха у поверхности продукта. Согласно уравнению (3.46), увеличение скорости

движения воздуха на 50% увеличивает производительность испарителя примерно на 25%. Если уменьшить змеевики испарителя или разницу температур на них, то  $\theta_e$  и  $\theta_{ss}$  возрастут сравнимо с установками, работающими при более низких значениях  $u_a$ . Предположим, что используется змеевик меньших размеров, так что значения  $\theta_e$  и  $\theta_{ss}$  останутся теми же. В этом случае КПД будет 1,53, а

$$\phi_{comp} = \frac{90,0}{1,53} = 58,8 \text{ кВт.}$$

С учетом энергопотребления вспомогательного оборудования, равного 8,8 кВт (15% от  $\phi_{comp}$ ), полное энергопотребление составит  $58,8 + 8,8 + 47,4 = 115,0$  кВт в течение 24 ч, что дает рост энергопотребления в 111% по сравнению с 81,9 кВт при 16 ч работы морозильных аппаратов со скоростью движения воздуха 2 м/с [ $115 \cdot 24 / (81,9 \cdot 16) = 2,11$ ].

В заключение следует отметить, что увеличение скорости движения воздуха лишь на 50% вызывает 12%-ное снижение  $t_f$ . Это позволяет использовать морозильный аппарат вместимостью 500 коробок для замораживания суточной нормы продукта за два цикла при условии, что  $\theta_{fin}$  увеличится до  $-15^\circ\text{C}$ . При этом требуемая производительность аппарата изменяется незначительно, но увеличивается энергопотребление (до 111%). Чтобы правильно оценить этот вариант, необходимо сравнить рост затрат на электроэнергию и возможное снижения качества продукта из-за высокой  $\theta_{fin}$  с экономией капитальных затрат вследствие использования не двух, а лишь одного морозильного аппарата.

Возможно, что лучше всего было бы иметь два морозильного аппарата, но снизить  $u_a$  до значения менее 2 м/с. Если  $t_f$  будет меньше 24 ч, с помощью двух аппаратов вместимостью 500 коробок можно будет обеспечить полную суточную производительность. Например, снижение  $u_a$  до 1,0 м/с дает  $h = 4,4$  Вт/(м<sup>2</sup> · К),  $E = 1,14$ ,  $t = 19,6$  ч,  $\phi_{fan} = 3,0$  кВт, что приводит к снижению общего энергопотребления и обеспечивает необходимую производительность морозильного аппарата.

### 3.9.9 Пример 9: Влияние изменения производительности аппарата на его характеристики

Рассмотрим воздушный морозильный аппарат непрерывного действия с интенсивным движением воздуха с температурой  $\theta_a = -30^\circ\text{C}$ , которая поддерживается двухступенчатой холодильной установкой, характеризующейся температурами  $\theta_e = -38^\circ\text{C}$  и  $\theta_{ss} = -40^\circ\text{C}$ . Тепловая нагрузка от продукта составляет 75% общей тепловой нагрузки.

Определим, какое влияние на характеристики работы аппарата окажет увеличение его производительности на 20 % при неизменной температуре продукта на выходе из аппарата.

- Для увеличения производительности аппарата на 20% при неизменной температуре время замораживания  $t_f$  должно быть уменьшено на  $(1,0/1,20 = 0,83)$  17%. Для этого понизим температуру воздуха  $\theta_a$ . На основе данных примера 7, используя уравнение 3.10, можно показать, что для снижения  $t_f$  на 17% следу-

ет понизить  $\theta_a$  с  $-30$  до  $-35,2$  °С. В результате общая тепловая нагрузка  $\phi_{tot}$  увеличится. Тепловая нагрузка от продукта увеличится пропорционально увеличению производительности аппарата при неизменной температуре продукта. Кроме того, несколько возрастет нагрузка, связанная с инфильтрацией воздуха и теплопритоком через изоляцию. Общая тепловая нагрузка увеличится приблизительно на 15%, так как тепловая нагрузка на продукт составляет 75% от  $\phi_{tot}$  ( $1,2 \cdot 0,75 + 0,25 = 1,15$ ).

- Разность температур воздуха и кипения хладагента, составлявшая 8 К, увеличится на 15% и составит  $PT = 9,2$  К.
- Понизится температура кипения  $\theta_e = \theta_a - PT = -35,2 - 9,2 = -44,4$  °С.
- Понизится температура  $\theta_{ss}$  вследствие увеличения  $\phi_{tot}$  и уменьшения  $\theta_e$ . Согласно уравнению (3.48) при возрастании  $\phi_{tot}$  на 15% падение давления увеличится примерно на 29% ( $1,15^{1,8} = 1,29$ ).
- Для определения значения  $\Delta P$ , которое возрастет из-за снижения  $\theta_e$  с  $-40,0$  до  $-44,4$  °С, используем уравнение (3.47):

$$\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1} = 1,07^{[-40,0 - (-44,4)]} = 1,35.$$

- Значение  $\Delta P$  увеличится на 74% ( $1,29 \cdot 1,35 = 1,74$ ). Снижение температуры, эквивалентное падению давления, возрастет с  $2,0$  до  $3,5$  °С ( $2,0 \cdot 1,74 = 3,5$ ).
- Тогда новое значение температуры будет равно  $\theta_{ss} = \theta_e - \Delta P = -44,4 - 3,5 = -47,9$  °С.
- С уменьшением температуры  $\theta_{ss}$  уменьшается холодопроизводительность компрессора. Из графика, представленного на рис. 3.10, следует, что относительная холодопроизводительность компрессора ступени низкого давления при  $\theta_{ss} = -47,9$  °С составляет 66% по сравнению с 94% при  $\theta_{ss} = -40$  °С.
- Общее увеличение холодопроизводительности компрессора ступени низкого давления из-за увеличения  $\phi_{tot}$  и уменьшения  $\theta_{ss}$  составит примерно 74% ( $1,15/0,66 = 1,74$ ). Аналогично, увеличение холодопроизводительности компрессора ступени высокого давления составит около 22% ( $1,15/0,94 = 1,22$ ).
- Согласно рис. 3.11 при двухступенчатом сжатии и температурах конденсации  $30$  °С и всасывания  $\theta_{ss} = -40$  °С, холодильный коэффициент составляет  $XK = 1,66$ , а при  $\theta_{ss} = -47,9$  °С —  $1,45$ . Энергопотребление холодильной установки с такой же тепловой нагрузкой увеличится на 14% ( $1,66/1,45 = 1,14$ ) из-за уменьшения производительности при более низких значениях условий всасывания.
- Общее увеличение энергопотребления компрессора, включая увеличение тепловой нагрузки на 15%, составит около 31% ( $1,15 \cdot 1,14 = 1,31$ ).

В результате увеличение выхода продукции на 20% потребует увеличения холодопроизводительности компрессоров ступени низкого и высокого давления на 74 и 22% соответственно, что повлечет увеличение энергопотребления на 31%. Если нет запаса по холодопроизводительности, рациональнее всего увеличить размер моро-



зильного аппарата так, чтобы при первоначальном режиме работы и продолжительности пребывания продукта в аппарате был увеличен выход продукта. Другим решением этой проблемы может быть повышение температуры продукта на выходе путем сокращения продолжительности его нахождения в холодильной камере (недостатком этого решения может оказаться снижение качества продукта). Данный пример показывает, насколько опасной может оказаться эксплуатация имеющейся холодильной установки в режимах, превышающих расчетные. Важной чертой любой холодильной установки и системы ее охлаждения является простота ее расширения.

### 3.9.10 Пример 10: Сравнение криогенного и воздушного морозильных аппаратов

Сравним затраты на замораживание продуктов в криогенном аппарате, охлаждаемом жидким азотом, и воздушном аппарате производительностью 1000 кг/ч от начальной температуры 20 °С до конечной –20 °С.

Продукт содержит 60% воды, 15% жира, его температура замерзания составляет –1 °С, а стоимость равняется 4 у. е./кг. Стоимость жидкого азота — 0,11 у. е./кг, а электроэнергии — 0,05 у. е./кВт. Двухступенчатая холодильная установка, работающая при температуре всасывания насыщенного пара –45 °С и температуре конденсации 30 °С, поддерживает температуру охлаждающего воздуха –35 °С. Годовая наработка морозильных аппаратов составляет 4000 ч.

Используя методы расчета, приведенные в разделе 3.5, получим следующие значения теплофизических характеристик:

$$c_u = 3193 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); \quad c_f = 2115 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); \quad L = 174 \cdot 10^3 \text{ Дж}/\text{кг}; \quad \theta_{if} = -1,0 \text{ °С}.$$

Тепловая нагрузка от продукта при известных производительности аппарата  $W_{pr} = 1000 \text{ кг}/\text{ч}$ ;  $t_{pr} = 3600 \text{ с}$ ;  $\theta_{out} = -20,0 \text{ °С}$ ;  $\theta_i = 20,0 \text{ °С}$  находится по уравнению (3.42):

$$\phi_{pr} = \frac{1000 \cdot \{3193 \cdot [20,0 - (-1,0)] + 174\,000 + 2115 \cdot [-1,0 - (-20,0)]\}}{3600 \cdot 1000} = 77,5 \text{ кВт}.$$

Некоторые компоненты тепловой нагрузки берем из табл. 3.5.

#### 3.9.10.1 Криогенный морозильный аппарат

Для азотного морозильного аппарата принимаем, что тепловая нагрузка от вентиляторов составляет 4%, а от других компонентов (включая период подготовки) — 6% от общей нагрузки; нагрузка от продукта составляет 90% от общей. Следовательно,

$$\phi_{tot} = 77,5/0,90 = 86,1 \text{ кВт}; \quad \phi_{fan} = \phi_{tot} \cdot 0,04 = 86,1 \cdot 0,04 = 3,4 \text{ кВт}.$$

Допустим, что жидкий азот хранится при давлении 2 МПа (–175 °С) и выходит из морозильного аппарата, имея температуру –10 °С (0,101 МПа); энтальпии на входе и выходе определяются по табл. 3.6:

$$H_{in} = 120 \text{ кДж}/\text{кг}; \quad H_{out} = 424 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Расход жидкого азота определяется по уравнению (3.50):

$$m_r = \frac{86,1}{(424 - 120)} = 0,283 \text{ кг/с} = 1020 \text{ кг/ч.}$$

Расход жидкого азота составляет 1,02 кг на кг продукта. Это относительно небольшой расход по сравнению с некоторыми другими ситуациями, температура газа на выходе высока, а содержание влаги в продукте ниже, чем часто бывает. Годовые затраты на жидкий азот составят  $4000 \cdot 1000 \cdot 1,02 = 448\,800$  у. е. Затраты на работу вентиляторов составят в год  $4000 \cdot 3,4 \cdot 0,05 = 680$  у. е. Добавляется также стоимость потерянной массы продукта, которая для азотных аппаратов находится обычно в диапазоне от 0,1 до 1% (см. п. 3.8.2.3). Поскольку температура азота на выходе довольно высока, то потеря массы будет ближе к верхней границе этого диапазона — предположим, 0,75%. Годовые затраты на потерю продукта составляют  $4000 \cdot 1000 \times 0,0075 \cdot 4,00 = 120\,000$  у. е.

Итого, общие эксплуатационные затраты за год (за исключением затрат на техническое обслуживание, рабочую силу и амортизацию) составят 569 500 у. е.

### 3.9.10.2 Воздушный морозильный аппарат

В подобной установке тепловая нагрузка от вентиляторов составит 25%, а от других компонентов — 20% от общей нагрузки (см. табл. 3.5). Тепловая нагрузка от продукта составит 55% от общей, тогда

$$\phi_{tot} = 77,5 / 0,55 = 140,9 \text{ кВт}, \quad \phi_{fan} = \phi_{tot} \cdot 0,25 = 140,9 \cdot 0,25 = 35 \text{ кВт.}$$

Из графика для двухступенчатой холодильной установки, представленного на рис. 3.11, следует, что ее ХК приблизительно 1,52, а ее энергопотребление составляет

$$\phi_{comp} = 140,9 / 1,52 = 92,7 \text{ кВт.}$$

Если 13,9 кВт (15% от  $\phi_{comp}$ ) приходится на вспомогательные устройства, то общее энергопотребление составит

$$\phi_{tot} = 92,7 + 13,9 + 35,0 = 141,6 \text{ кВт.}$$

В этом случае годовые затраты на электроэнергию будут  $4000 \cdot 141,6 \cdot 0,05 = 28\,300$  у. е. Если потери массы продукта составляют 2,5% (см. п. 3.8.2.3), то годовые затраты на потерю массы продукта будут равны  $4000 \cdot 1000 \cdot 0,025 \cdot 4,00 = 400\,000$  у. е.

Таким образом, годовые эксплуатационные затраты (за исключением заработной платы персонала, расходов на ремонт и амортизацию) составят 428 300 у. е.

### 3.9.10.3 Сравнительный анализ морозильных аппаратов

Расчеты показали, что годовые эксплуатационные затраты, связанные с работой азотного морозильного аппарата, больше (на 141 200 у. е. в год), чем воздушного, но они могут быть компенсированы сокращением капитальных затрат, затрат на техни-

ческое обслуживание, заработную плату персонала и улучшением качества продукта. Эксплуатационные затраты в значительной степени зависят от потери массы продукта. Во многих случаях сокращение потери массы продукта не дает непосредственного увеличения дохода от продажи, как было допущено в вышеприведенном примере, но зато дает непосредственное улучшение качества продукции. К сожалению, бывает очень трудно точно оценить преимущества от улучшения качества и затраты вследствие потери массы продукта. Для снижения потери массы продукта можно использовать комбинированную криогенную установку (см. п. 3.2.4) или упаковывать продукт в защитную пленку еще до его замораживания.

## Глоссарий

**Морозильный аппарат периодического действия** — морозильный аппарат, работающий периодически, когда период замораживания чередуется с периодом подготовки к последующему замораживанию.

**Бустерный компрессор** — компрессор ступени низкого давления, работающий при относительно низком давлении кипения.

**Холодопроизводительность** — производительность компрессора, выраженная в тепловых единицах, кВт.

**Холодильный коэффициент** — отношение холодопроизводительности компрессора к потребляемой им энергии (мощности).

**Морозильный аппарат непрерывного действия** — морозильный аппарат, который замораживает непрерывно движущийся поток продукта.

**Температура кипения или конденсации** — температура, при которой хладагент кипит в испарителе или конденсируется в конденсаторе.

**Змеевики испарителя** — теплопередающие трубы испарителя, выполненные в виде змеевика.

**Среднее взвешенное значение температуры** — средняя температура состоящего из частей объекта, рассчитанная с учетом массовых долей частей.

**Пористый пищевой продукт** — пищевой продукт, состоящий из относительно твердой основы и полостей, заполненных воздухом.

**Насыщенная температура всасывания или нагнетания** — температура пара, всасываемого в компрессор или нагнетаемого компрессором, значение которой учитывает падение давления во всасывающем или нагнетательном трубопроводах, выраженное температурным эквивалентом.

**Температурный эквивалент** — изменение температуры насыщенного хладагента, эквивалентное падению давления в трубопроводе вследствие трения.

**Термический центр** — точка (линия) в объеме пищевого продукта, охлаждающаяся наиболее медленно при замораживании.

## Список обозначений

$A$	площадь, $m^2$ ;
$b$	отношение связанной воды к массовой доле твердой части;

$Bi$	число Био;
$c$	удельная теплоемкость, Дж/(кг · К);
$XK$	холодильный коэффициент;
$E$	коэффициент формы;
$ESP$	внешнее статическое давление, Па;
$h$	коэффициент теплопередачи, Вт/(м <sup>2</sup> · К);
$H$	энтальпия, Дж/кг;
$k$	коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К);
$K$	коэффициент массопередачи, отнесенный к разности парциальных давлений водяного пара, с/м;
$L$	скрытая теплота замораживания, Дж/кг;
$L'$	скрытая теплота замораживания воды, Дж/кг;
$m$	массовый расход, кг/с;
$M$	молекулярная масса, кг/кмоль;
$p$	парциальное давление водяного пара, Па;
$Q$	объемный расход, м <sup>3</sup> /с;
$R$	газовая постоянная, кДж/(кмоль · К) (только в уравнениях 3.19 и 3.20);
$R$	полутолщина продукта, м;
$t$	время, с;
$T$	температура, К;
$TD$	разность температур между воздухом и кипением хладагента, К;
$u$	скорость движения, м/с;
$UA$	качество испарителя, Вт/К;
$v$	объемная доля;
$V$	объем, м <sup>3</sup> ;
$W$	масса продукта, кг;
$x$	расстояние в направлении оси $x$ , м;
$X$	массовая доля;
$\beta$	отношение осей эквивалентного эллипса;
$\Gamma$	угловой коэффициент излучения;
$\epsilon$	коэффициент излучения (только для уравнения (3.38));
$\epsilon$	пористость;
$\theta$	температура, °С;
$\sigma$	постоянная Стефана–Больцмана, равная $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м <sup>2</sup> · К <sup>4</sup> );
$\rho$	плотность, кг/м <sup>3</sup> ;
$\phi$	расход тепла, тепловая нагрузка или подвод энергии, Вт;
$\Delta P$	разность (падение) давлений, Па или К.

## Литература

1. Arce, J. A. and Sweat, V. E. Survey of published heat transfer coefficients encountered in food processes // ASHRAE Trans. — 1980. — № 86(2). — P. 235–260.
2. ASRAE Handbook — Fundamentals. — Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1989.
3. ASHRAE Handbook — Refrigeration. — Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1990.



4. Awonorin, S. O. A model for heat transfer in cryogenic food freezing // *Int. J. Food Sci. Technol.* — 1989. — № 124. — P. 243–259.
5. Chavariia, V. M. and Heldman, D. R. Measurement of convective heat transfer coefficients during food freezing processes // *J. Food Sci.* — 1984. — № 49. — P. 810–814.
6. Choi, Y. and Okos, M. R. Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods // *Food Engineering and Process Applications* / Le Mageur, M. and Jelen, P. (eds.) — London: Elsevier, 1986. — P. 93–101.
7. Cleland, A. C. A rapid empirical method for estimation of energy savings from refrigeration plant alterations // *Refrig. Sci. and Technol.* — 1988. — № 3. — P. 215–221.
8. Cleland, A. C. *Food Refrigeration Processes — Analysis, Design and Simulation.* — London: Elsevier, 1990.
9. Cleland, D. J. A generally applicable simple method for prediction of food freezing and thawing times // *Proc. XVIII Int. Congr. Refrig.* — 1991. — № 4. — P. 1874–1877.
10. Cleland, A. C. Polynomial curve-fits for refrigerant thermodynamic properties — extension to include R-134f // *Int. J. Refrig.* — 1994. — № 17. — P. 245–249.
11. Cleland, A. C. and Cleland, D. J. *Cost-Effective Refrigeration.* — Palmerston North, New Zealand: Massey University, 1992.
12. Cowell, N. D. and Namor, M. S. S. Heat transfer coefficients in plate freezing: the effect of packaging materials // *Refrig. Sci. and Technol.* — 1974. — № 3. — P. 45–50.
13. Coulson, J. M. and Richardson, J. F. *Chemical Engineering, Vol. 1.* — 3rd ed. — London: Pergamon Press, 1977.
14. Creed, P. G. and James, S. J. Heat transfer during the freezing of liver in a plate freezer // *Food Sci.* — 1985. — № 50. — P. 285–288, 294.
15. Fennema, O. R. Freezing preservation // *Principles of Food Science. Part II. Physical Principles of Food Preservation* / Fennema, O. R. (ed.). — New York: Marcel-Dekker, 1975. — P. 173–215.
16. Flores, E. S. and Mascheroni, R. H. Determination of heat transfer coefficients for continuous belt freezers // *J. Food Sci.* — 1988. — № 53. — P. 1872–1876.
17. Hallstrom, B., Skjoldebrand, C., and Tragardh, C. *Heat Transfer and Food Products.* — London: Elsevier, 1988.
18. Hayes, G. D. *Food Engineering Data Handbook.* — London: Longman, 1987.
19. *Handbook of Food Engineering* / Heldman, D. R. and Lund, D. B. (ed.). — New York: Marcel Dekker, 1992.
20. Heldman, D. R. and Singh, R. P. *Food Process Engineering.* — 2nd ed. — Westport, CT: AVI Publishing, 1981.
21. Holland, B., Welch, A. A., Unwin, I. D., Buss, D. H., Paul, A. A., and Southgate, D. A. T. McCance and Widdowson's — *The Composition of Foods.* — 5th ed. — Cambridge, U. K: Royal Society of Chemistry and Ministry of Agriculture, Fisheries and Food. — 1991.
22. Hossain, Md. M., Cleland, D. J., and Cleland, A. C. Prediction of freezing and thawing times for foods of three-dimensional irregular shape by using a semi-analytical geometric factor // *Int. J. Refrig.* — 1992. — № 15. — P. 241–246.
23. *Physical Properties of Foods* / Jowitt, R., Escher, F., Hallstrom, B., Meffert, H. F. T., Spiess, W. E. L., and Vos, G. (eds.). — London: Applied Science Publishers, 1983.
24. Kent, M. A., Christiansen, K., van Haneghem, I. A., Morley, M. J., Newvadba, P., and Poulsen, K. P. COST90 collaborative measurements of thermal properties of foods // *J. Food Eng.* — 1984. — № 3. — P. 117–150.
25. Khairullah, A. and Singh, R. P. Optimization of fixed and fluidized bed freezing processes // *Int. J. Refrig.* — 1991. — № 14. — P. 176–181.

26. Lovatt, S. J., Pham, Q. T., Cleland, A. C., Loeffen, M. P. F. Prediction of product heat release as a function of time in food cooling. Part 2. Experimental testing // J. Food Eng. — 1993. — № 18. — P. 37–62.
27. Mannapperuma, J. D., Singh, R. P., and Reid, D. S. Effective heat transfer coefficients encountered in air blast freezing of whole chicken and chicken parts, individually and in packages // Int. J. Refrig. — 1994. — № 17. — P. 263–272.
28. Mannapperuma, J. d., Singh, R. P., and Reid, D. S. Effective heat transfer coefficients encountered in air blast freezing of single plastic wrapped whole turkey // Int. J. Refrig. — 1994. — № 17. — P. 273–280.
29. Mellor, J. D. Thermophysical properties of foodstuffs. I. Introductory review // Bull. Int. Inst. Refrig. — 1976. — № 56. — P. 551–563.
30. Mellor, J. D. Thermophysical properties of foodstuffs. II. Theoretical aspects // Bull. Int. Inst. Refrig. — 1978. — № 58. — P. 569–584.
31. Mellor, J. D. Thermophysical properties of foodstuffs. III. Measurements // Bull. Int. Inst. Refrig. — 1979. — № 59. — P. 551–563.
32. Mellor, J. D. Thermophysical properties of foodstuffs. IV. General Bibliography // Bull. Int. Inst. Refrig. — 1980. — № 60. — P. 493–515.
33. Miles, C. A., van Beek, G., and Veerkamp, C. H. Calculation of thermophysical properties of foods // Physical Properties of Food / Jowitt, R. (ed.). — London: Applied Science Publishers, 1983. — P. 269–313.
34. Mohsenin, N. N. Thermal Properties of Foods and Agricultural Materials. — NY: Gordon and Breach, 1980.
35. Morley, M. J. Thermal Properties of Meats: Tabulated Data. — Langford, U.K: Meat Research Institute, 1972.
36. Murakami, E. G. and Okos, M. R. Measurement and prediction of thermal properties of foods // Food Properties and Computer Aided Engineering of Food Processing Systems/ Singh, R. P. and Medina, A. G. (eds.). — Amsterdam: Kluwer Academic Publishing, 1989. — P. 3–48.
37. Pham, Q. T. Simplified equation for predicting the freezing time of foodstuffs // J. Food Technol. — 1986. — № 21. — P. 209–219.
38. Pham, Q. T. Calculation of bound water in frozen food // J. Food Sci. — 1987. — № 52. — P. 210–212.
39. Pham, Q. T. Boisture transfer due to temperature changes of fluctuations // J. Food Eng. — 1987. — № 6. — P. 33–49.
40. Pham, Q. T. A converging front model for the asymmetric freezing of slab-shaped food // J. Food Sci. — 1987. — № 52. — P. 795–800.
41. Pham, Q. T. Prediction of thermal conductivity of meats and other animal products from composition data // Engineering and Food, Vol. 1 / Speiss, W. E. L. and Schubert, H. (eds.). — London: Elsevier, 1990. — P. 408–423.
42. Pham, Q. T. and Willix, J. Heat transfer in the air blast freezing and thawing of cartons / Meat Research Institute of New Zealand, Report No. 845. — Hamilton, New Zealand, 1986
43. Rask, C. Thermal propeties of dough and bakery products: a review of published data // J. Food Eng. — 1989. — № 9. — P. 167–193.
44. Rasmussen, C. L. and Olson, R. L. Freezing methods as related to cost and quality // Food Technol. — 1972ю — № 26(12). — P. 32–47.
45. Schwartzberg, H. G. Effective heat capacities for the freezing and thawing of foods // J. Food Sci. — 1976. — № 41. — P. 153–156.

46. Singh, R. P. and Mannapperuma, J. D. Developments in food freezing // Biotechnology and Food Process Engineering / Schwartzberg, H. G. and Rao, M. A. (eds.). — NY: Marcel Dekker, 1990. — P. 309–358.
47. Stoecker, W. F. Industrial Refrigeration. — Troy, MI: Business News Publishing. — 1988.
48. Sweat, V. E. Experimental values of thermal conductivities of selected fruit and vegetables // J. Food Sci. — 1974. — № 39. — P. 1080–1083.
49. Sweat, V. E. Thermal properties of low- and intermediate-moisture food // ASHRAE Trans. — 1985. — № 91(2A). — P. 369–385.
50. Sweat, V. E. Thermal conductivity of food; present state of the data // ASHRAE Trans. — 1985. — № 91(2B). — P. 299–311.
51. Varquez, A. and Calvelo, A. Gas particle heat transfer coefficient in fluidized pea beds // J. Food Process Eng. — 1980. — № 4. — P. 53–70.
52. Watt, B. K. and Merrill, A. L. Composition of Foods // Agriculture Handbook No. 8. — Washington, D. C: U. S. Department of Agriculture. — 1975.

# 4 ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУШИЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

*Гильермо Х. Краписте и Энрике Ротштейн*

*Перевод Н. Савченкова под ред. канд. техн. наук, доцента Д. А. Куприна*

## Содержание

- 4.1 Введение
- 4.2 Основные положения
  - 4.2.1 Механизмы массообмена и теплопередачи
  - 4.2.2 Кинетика сушки пищевых продуктов
  - 4.2.3 Влияние внешних условий на сушку
  - 4.2.4 Диффузионная модель
  - 4.2.5 Характеристическая кривая сушки
  - 4.2.6 Модель отступающего фронта
- 4.3 Балансы массы и энергии
  - 4.3.1 Пример 1
  - 4.3.2 Смешивание воздушных потоков
    - 4.3.2.1 Пример 2
  - 4.3.3 Сгорание газа
    - 4.3.3.1 Пример 3
  - 4.3.4 Интенсивность воздушного потока
    - 4.3.4.1 Пример 4
- 4.4 Варианты применения
  - 4.4.1 Лотковые сушилки или сушильные шкафы
    - 4.4.1.1 Пример 5
    - Первый период сушки
    - Второй период сушки
    - Третий период сушки
  - 4.4.2 Туннельные и конвейерные сушилки
    - 4.4.2.1 Пример 6
  - 4.4.3 Барабанные сушилки
    - 4.4.3.1 Пример 7
  - 4.4.4 Распылительные или пневматические сушилки
    - 4.4.4.1 Пример 8
- 4.5 Выбор сушилки
  - 4.5.1 Оценка затрат
  - 4.5.2 Риски, возникающие в процессе сушки

Литература

## 4.1 Введение

На протяжении столетий во всем мире для консервирования различной пищевой и сельскохозяйственной продукции применялась сушка или дегидратация. В настоящее время процесс сушки является основным методом консервирования пищевых продуктов, а также важной операцией, получившей распространение во многих отраслях пищевой промышленности.

Основная задача дегидратации пищевых продуктов — удаление воды до такого уровня, при котором сводится к минимуму возможность развития микроорганизмов, что продлевает срок хранения продукта. Кроме того, что повышается стойкость продукта, это также влечет значительное снижение массы и объема, что, в свою очередь, способствует снижению затрат на упаковку, транспортировку и хранение пищевых продуктов. В процессе сушки пищевые продукты подвергаются физическим и биохимическим изменениям, которые могут оказывать влияние на те или иные свойства продукта — например, на структуру, цвет, запах и пищевую ценность. Таким образом, второй задачей сушки должно стать производство обезвоженных продуктов питания хорошего качества (с точки зрения их питательных и органолептических свойств).

Сушилки можно классифицировать на основе метода подвода теплоты, вида сушильного агента, способа транспортировки продукта, характера и режима подачи сырья, режима и продолжительности нахождения продукта в сушилке. Ввиду значительного разнообразия свойств высушиваемых материалов, а также разнообразности подвергающихся сушке пищевых продуктов, в пищевой промышленности ис-

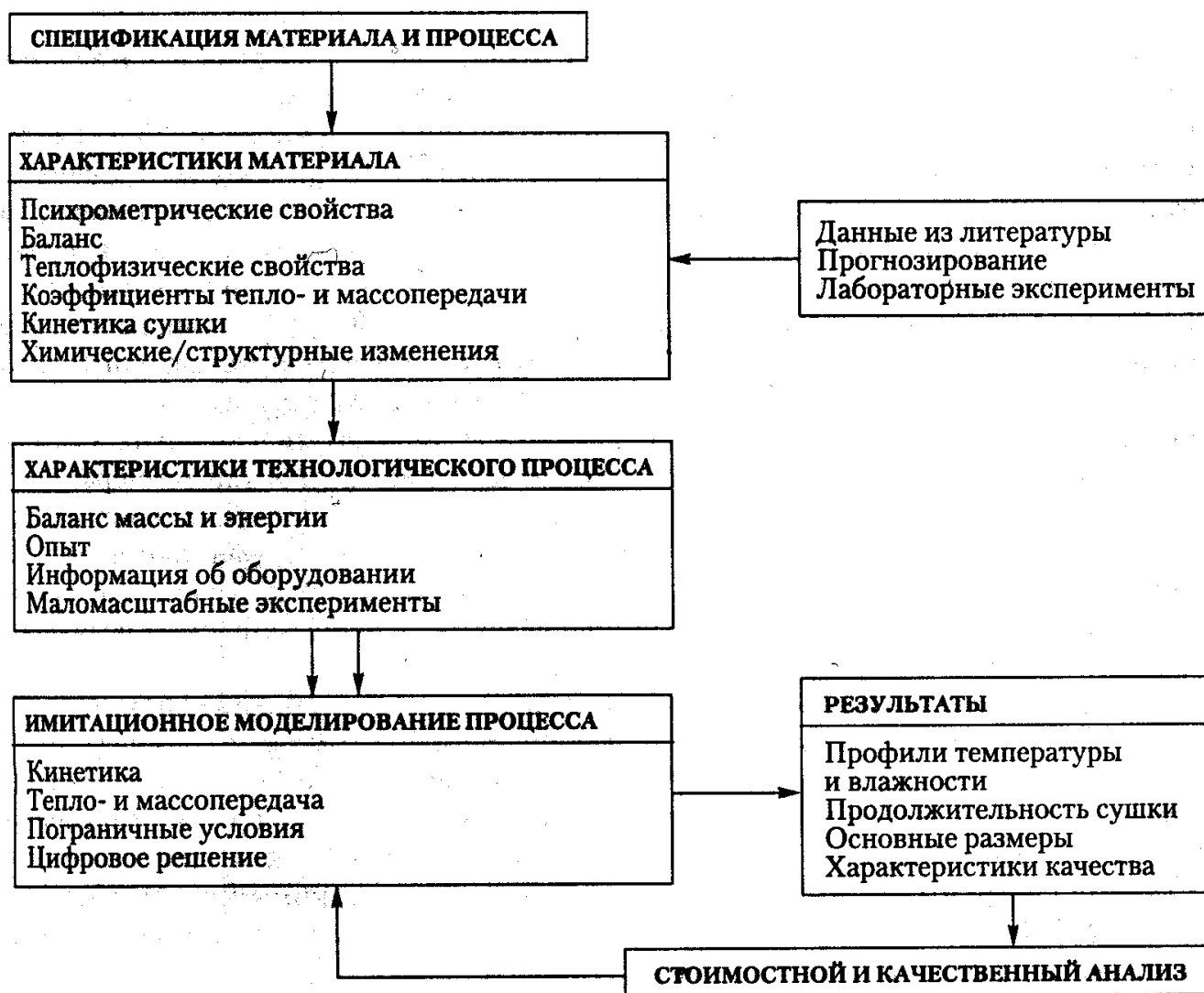
Таблица 4.1. Варианты применения выбранных сушильных аппаратов (сушилок)

Тип оборудования	Используемый продукт
Лотковые сушилки или сушильные шкафы	Фрукты, овощи, мясные продукты, кондитерские изделия
Тоннельные сушилки	Фрукты, овощи
Ленточные сушилки	Овощи, крупы, фрукты, зерновые продукты, орехи
Барабанные (поворотные) сушилки	Семена, крупы, крахмал, сахар
Пневматические сушилки или сушилки мгновенного действия	Крахмал, мезга, зерновые культуры, гранулы, порошки
Сушилки с псевдоожиженным слоем	Овощи, гранулы, зерна, горох
Распылительные сушилки	Молоко, сливки, кофе, чай, соки, яйца, экстракты, сиропы
Вальцовые сушилки	Молоко, хлопья, супы, детское питание, соки, пюре
Агрегат для сушки во вспененном состоянии	Фруктовые соки и пюре
Агрегат для сушки со сбросом давления	Фрукты и овощи
Сублимационные сушилки	Хлопья, соки, мясо, креветки, кофе, овощи, экстракты

пользуется множество типов сушилок. Типовые сушилки и варианты их применения при обработке пищевых продуктов представлены в табл. 4.1.

На протяжении десятилетий промышленная сушка пищевых продуктов основывалась в большей степени на практическом знании секретов производства («ноу хау»), чем на основательном понимании технологии. Процесс сушки представляет собой очень сложный способ обработки пищевых продуктов, цель которого — получение сухих продуктов, соответствующих строгим требованиям и стандартам качества. Эффективность процесса сушки и качество готового сушеного продукта зависят от физических и химических свойств сырья, конструкции сушилки и ее эксплуатационного режима. На рис. 4.1 приведена блок-схема основных этапов, необходимых для конструирования и оптимизации работы сушилки пищевых продуктов.

### КОНСТРУИРОВАНИЕ СУШИЛЬНОГО АГРЕГАТА



### ОПТИМИЗАЦИЯ СУШИЛЬНОГО АГРЕГАТА

Рис. 4.1. Этапы конструирования и оптимизации срабатывания сушильного агрегата

Существует ряд учебников, касающихся принципов сушки, применения, выбора и конструкции сушилок [6, 9, 18, 19, 22, 25, 27, 41, 42, 44]. Процесс сушки пищевых продуктов рассматривается в ставшей классической книге «Дегидратация пищевых продуктов» [39] и в отдельных разделах различных работ, посвященных оборудованию пищевых производств [8, 12, 34]. Кроме того, за последние десятилетия были опубликованы сотни работ и всеобъемлющих исследований, рассматривающих основополагающие аспекты сушки пищевых продуктов (см., например, [3, 7, 11, 15, 26]).

Задачей данного раздела является рассмотрение основных принципов и технологии сушки пищевых продуктов, включая основы технологического процесса и практические способы применения и оценки эксплуатационных характеристик сушильных агрегатов.

## 4.2 Основные положения

Расчеты процесса сушки основываются на знании свойств воздуха и материалов. Содержание воздуха и пара, психрометрические свойства влажного воздуха приводятся в литературе в виде психрометрических таблиц и графиков [18, 25, 27], математических уравнений [2] или компьютерных программ [32]. Гигроскопические характеристики продукта, а также его теплофизические свойства рассчитываются в ходе лабораторных экспериментов или прогнозируются посредством моделирования. Обзор теплофизических свойств пищевых продуктов приводится в главе 11.

Процесс сушки влияет на качество готового продукта. Происходящие в процессе сушки изменения в пищевых продуктах, а также наиболее распространенные реакции, ухудшающие их качество, даны в работе [7]. Одной из задач дегидратации является обеспечение микробиологического качества. Потеря питательной ценности продукта происходит в основном за счет влияния на витамины и белки температуры и удаления влаги. При сушке существенно меняются органолептические свойства продукта — такие, как структура, цвет и вкус. Изменения в структуре влияют на растворимость и способность к регидратации. Одна из важных проблем, возникающая при обработке и хранении сухих пищевых продуктов, — изменение цвета в результате ферментативного и неферментативного потемнения.

Важными причинами ухудшения качества являются ослабление аромата и развитие посторонних привкусов. Для моделирования и оптимизации процесса сушки с точки зрения обеспечения качества необходимо знать кинетику процесса, которая учитывает взаимосвязь температуры и содержания влаги, но в этом аспекте наблюдается как недостаток экспериментальных данных, так и отсутствие прикладных программ для имитационного моделирования. Таким образом, обоснование условий сушки продукта и прогнозирование его качества по-прежнему сложная задача [7, 21, 23].

Для конструирования сушильных агрегатов наиболее важную информацию предоставляет кинетика сушки, которая будет рассмотрена ниже. Уравнение скорости сушки является неотъемлемой частью балансов массы и энергии, применяемых при имитационном моделировании сушилок.

## 4.2.1 Механизмы массообмена и теплопередачи

Как схематически показано на рис. 4.2, в процессе сушки происходят одновременно два процесса переноса: 1) теплопередача от внешней среды к поверхности высушиваемого пищевого продукта, совмещенная с теплопроводностью внутри самого продукта, и 2) перенос массы изнутри материала к его поверхности с последующей отдачей влаги во внешнюю среду. В зависимости от пищевого продукта и условий сушки процесс испарения может происходить либо на поверхности продукта, либо внутри него.

Передача энергии высушиваемому материалу осуществляется за счет:

- конвекции, то есть потока нагретого воздуха, проходящего у поверхности продукта или внутри него; в большинстве промышленных методов сушки (то есть сушки с использованием лотков, ленточных конвейеров, аппаратов с мгновенным парообразованием, псевдоожиженного слоя, а также при распылительной сушке), передача тепла осуществляется именно конвекцией;
- кондукции (проводимости), то есть соприкосновения высушиваемого материала с горячей поверхностью (в случае использования лотковых или барабанных сушилок).

Теплопередача внутри продукта осуществляется в основном за счет теплопроводности ввиду градиента температуры и в меньшей степени — посредством конвекции из-за миграции влаги.

При моделировании данного процесса необходимо принимать во внимание внутренние и поверхностные источники энергии, возникающие в результате фазового

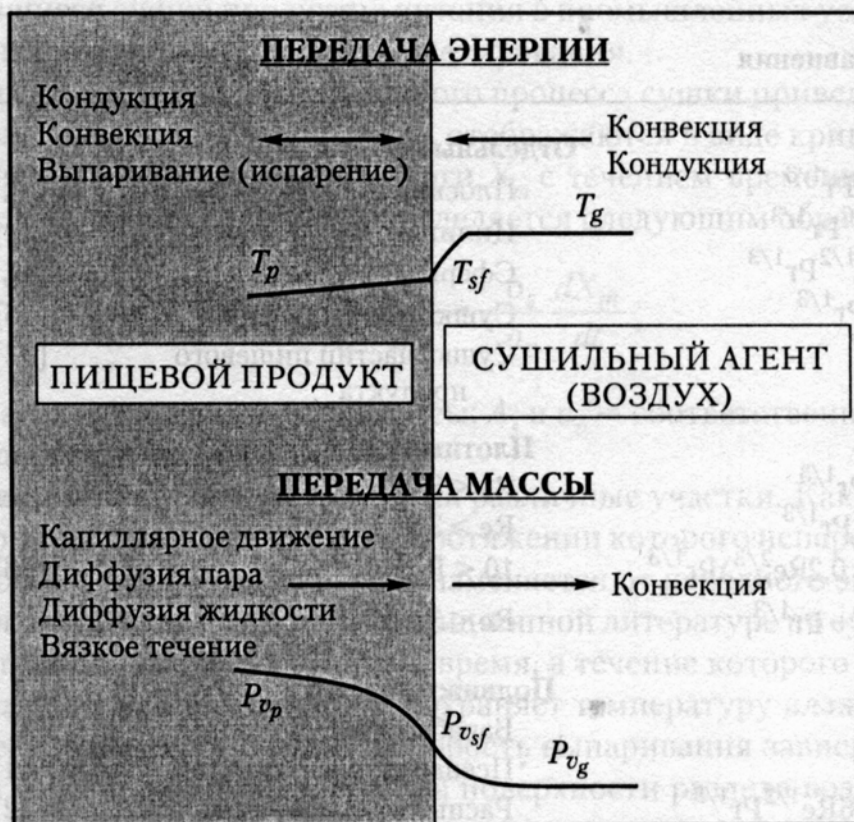


Рис. 4.2. Схематическое отображение процесса сушки пищевых продуктов



превращения воды (то есть испарения несвязанной воды, десорбции связанной воды или сублимации льда и поглощения энергии — особенно при сушке с нагревом токами высокой частоты и индукционной сушке). Дополнительные механизмы передачи тепла (например, излучение) или другие источники энергии (например, химические реакции) в сушке пищевых продуктов учитываются довольно редко.

Перемещение влаги в пищевых материалах может вызываться комбинацией различных механизмов передачи:

- капиллярного движения, происходящего благодаря градиентам давления в капиллярах;
- диффузии жидкости вследствие градиентов концентрации;
- диффузии пара в результате градиентов парциального давления;
- вязкого течения из-за градиентов общего давления, вызванного внешним давлением или разностью температур.

Другие механизмы, например, термодиффузия, поверхностная диффузия и перемещение в потоке, являющееся результатом давления усадки или сил тяжести, в массообмене участвуют в незначительной степени, и поэтому в процессе сушки пищевых продуктов во внимание не принимаются.

Массопередача от продукта во внешнюю среду в основном осуществляется за счет конвекции, и происходит она благодаря разнице в парциальном давлении пара на пограничном слое поверхности раздела продукта.

Таблица 4.2. Соотношения коэффициентов теплопередачи

Уравнения	Условия	Источник
<b>Отдельные частицы</b>		
$Nu = 0,664 Re^{1/2} Pr^{1/3}$	Плоский лист, $Re < 2 \times 10^5$	[4], [27]
$Nu = 0,683 Re^{0,466} Pr^{1/3}$	Цилиндр, $Re < 4 \times 10^3$	[27]
$Nu = 2,0 + 0,6 Re^{1/2} Pr^{1/3}$	Сферы, $Re < 5 \times 10^4$	[4], [27]
$Nu = 0,036 Re^{0,8} Pr^{1/3}$	Сушка, $Re > 1,5 \times 10^5$	[38]
$Nu = 0,249 Re^{0,64}$	Сушка частиц пищевого продукта	[32]
<b>Плотный слой</b>		
$Nu = 1,95 Re^{0,49} Pr^{1/3}$	$Re < 350$	[4], [27]
$Nu = 1,064 Re^{0,59} Pr^{1/3}$	$Re > 350$	[4], [27]
$Nu_{\epsilon} = (0,5 Re_{\epsilon}^{1/2} + 0,2 Re_{\epsilon}^{2/3}) Pr^{1/3}$	$10 < Re_{\epsilon} < 10^4$	[43]
$Nu_{\epsilon} = 2,52 Re_{\epsilon}^{0,499} + Pr^{1/3}$	$Re < 3 \times 10^3$	[5]
<b>Подвижный слой</b>		
$Nu = 0,33 Re^{0,6}$	Барабанные сушилки	[3]
$Nu = 0,024 Re^{0,84}$	Псевдооживленные слои	[41]
$Nu = 2,0 + 0,5 - 0,6 Re^{1/2} Pr^{1/3}$	Распылительные сушилки	[22]

Примечание:  $Nu = h_g L_p / k$ ,  $Re = L_p v_g \rho / \mu$ ,  $Pr = C_p / k$ ,  $Nu_{\epsilon} = h_g L_p \epsilon / k(1 - \epsilon)$ ,  $Re_{\epsilon} = L_p v_g \rho / \mu(1 - \epsilon)$ .

Непосредственное выпаривание происходит в тот момент, когда давление пара на поверхности становится больше окружающего давления, например, при использовании вакуумной или сублимационной сушки.

При конвективной сушке для удельного теплового потока  $q_c$  и интенсивности испарения  $n_w$  можно написать:

$$\text{тепловой поток} \rightarrow q_c = h_g (T_{sf} - T_g); \quad (4.1)$$

$$\text{поток влаги} \rightarrow n_w = k_g (p_{vsf} - p_{vg}), \quad (4.2)$$

где  $h_g$  и  $k_g$  — коэффициенты передачи тепла и массы;  $T$  — температура;  $p_v$  — парциальное давление водяного пара ( $p_{vsf}$  — у поверхности,  $p_{vg}$  — в окружающей среде). Давление пара на поверхности продукта может быть рассчитано по сорбционной изотерме  $p_v = f(X, T)$ .

Коэффициенты конвективного теплообмена представляют наиболее важные характеристики, необходимые для анализа и моделирования технологического процесса. Коэффициенты теплопередачи для различных поверхностей могут быть найдены в литературе [4, 5, 27, 43] или рассчитаны исходя из соответствующих экспериментов [32]. Несколько вариантов расчета коэффициентов конвективной теплопередачи в условиях сушки приводятся в таблице 4.2. Коэффициенты массообмена могут быть получены непосредственно из опытов [4, 38] или с учетом известных выражений коэффициентов теплопередачи (из аналогии массо- и теплообмена).

## 4.2.2 Кинетика сушки пищевых продуктов

Данные, касающиеся сушки продуктов питания в промышленных условиях, получают экспериментально или с помощью моделирования.

Качественные характеристики типичного процесса сушки приведены на рис. 4.3. Экспериментальные данные, как правило, отображаются в виде кривых сушки (график изменения среднего содержания влаги  $X_m$  с течением времени  $t$ ) или кривых скорости сушки. Скорость сушки  $n_w$  определяется следующим образом:

$$n_w = -\frac{m_s}{A_s} \frac{dX_m}{dt} = -\frac{\rho_s}{a_v} \frac{dX_m}{dt}, \quad (4.3)$$

где  $m_s$  и  $\rho_s$  — масса и плотность сухой массы;  $A_s$  и  $a_v$  — соответственно внешняя площадь и площадь на единицу объема.

Кривая сушки может быть разделена на различные участки. Как правило, существует некоторый начальный период, на протяжении которого испарение может происходить на поверхности, и температура изменяется от исходного значения до температуры по влажному термометру. В традиционной литературе по сушке ссылаются на период постоянной скорости сушки — время, в течение которого на поверхности имеется несвязанная влага, и материал сохраняет температуру влажного термометра. Этот процесс управляется извне, и скорость выпаривания зависит от диффузии водяного пара через пограничный слой на поверхности раздела воздуха и твердого тела. Для испарения воды с поверхности используется вся передаваемая от воздуха теплота. У большей части пищевых продуктов не существует периода постоянной

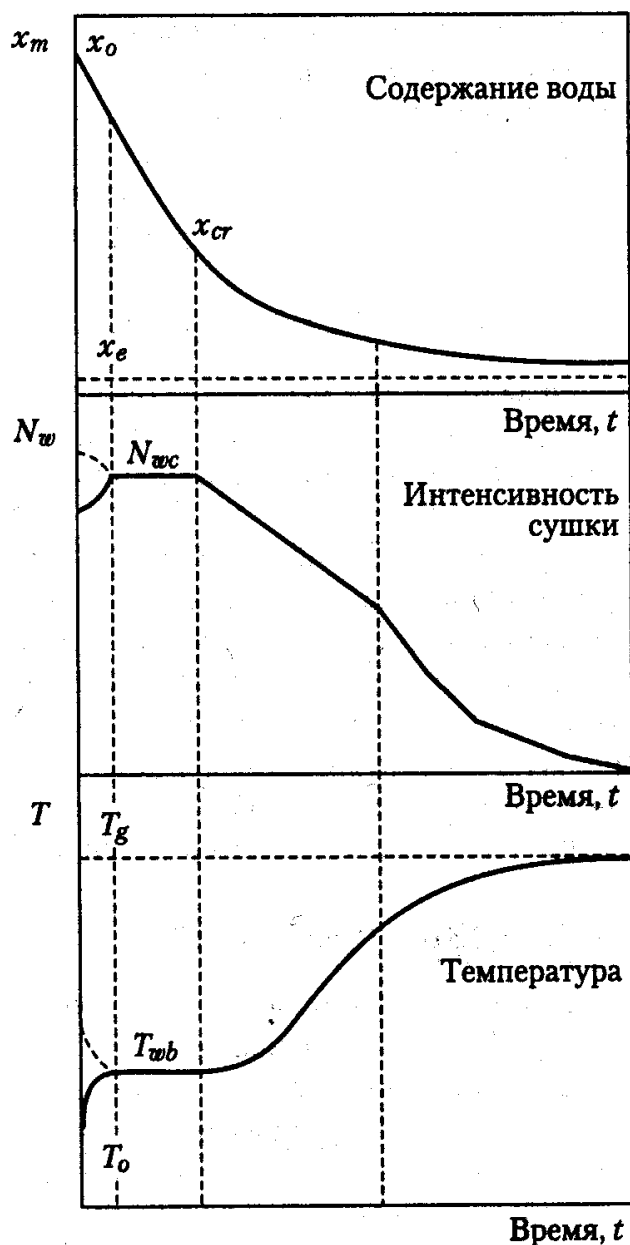


Рис. 4.3. Характеристики конвекционной сушки

скорости, что объясняется необходимостью прогрева для достижения температуры по влажному термометру  $T_{wb}$  тем, что вода не всегда является несвязанной, или тем, что поверхность увлажнена не полностью. Вследствие этого у некоторых материалов может наблюдаться период псевдопостоянной скорости сушки, и интенсивность сушки становится меньшей.

Точка, которая соответствует началу уменьшения скорости, обычно называется критическим содержанием влаги  $X_{cr}$ . При достижении этой точки содержание влаги на поверхности снижается, а температура поверхности становится выше температуры влажного термометра. Зона парообразования может постепенно перемещаться с поверхности внутрь материала. В зависимости от условий сушки и свойств материала, важное значение могут иметь и внутреннее, и внешнее сопротивления тепло-массопереносу.

При уменьшении содержания влаги внутреннее сопротивление теплопередаче возрастает, и при приближении к температуре сухого термометра оно может стать преобладающим. В этом случае иногда может возникать второй период снижения скорости, и управляющим механизмом здесь является скорость, при которой влага перемещается внутри продукта (в основном, путем диффузии водяного пара). Содержание влаги асимптотически приближается к  $X_e$ , значению равновесия при относительной влажности и температуре воздуха.

Как уже отмечалось выше, сушка отдельных частиц пищевых продуктов представляет собой комплексный процесс, включающий одновременную передачу энергии и массы в гигроскопичной системе с усадкой. Несмотря на то что разработка теории сушки велась довольно интенсивно и был достигнут значительный прогресс в понимании этого процесса, знания относительно механизмов управления каждой стадией дегидратации пищевых продуктов все еще недостаточны. В связи со сложностью этой проблемы ощущается также нехватка обоснованных теоретических моделей для прогнозирования экспериментальных кривых сушки, которые можно было бы применять в инженерной практике, и поэтому ниже мы рассмотрим лишь те модели, которые имеют практическое значение для конструирования и оценки сушильных агрегатов.

Механизмом управления является интенсивность, с которой влага перемещается внутри продукта (в основном, в виде водяного пара). Содержание влаги асимптотически достигает  $X_e$ , равновесного значения при данной относительной влажности и температуре воздуха.

Несмотря на значительность работ, проведенных в области разработки теорий сушки, и существенный прогресс в понимании процесса, знания, касающиеся механизма управления различными этапами дегидратации пищевых продуктов, до сих пор остаются довольно ограниченными. В связи с комплексностью данной проблемы число заслуживающих доверия теоретических моделей для прогнозирования экспериментальных кривых сушки, которые могли бы быть использованы в конструкторских расчетах, недостаточно. Данный материал будет ограничен исключительно теми моделями, которые могут найти практическое применение в конструкции и оценке используемого для сушки оборудования.

### 4.2.3 Влияние внешних условий на сушку

Внешние условия влияют на сушку в том случае, когда сопротивления теплопередаче и массообмену со стороны воздуха велики. На практике внешние влияния предполагаются при числе Био (Biot), меньшем 0,1 ( $Bi < 0,1$ ). В этом режиме кривые температуры и влаги внутри продукта плоские. Данный процесс аппроксимирует испарение несвязанной воды с поверхности твердого тела и может быть представлен в виде следующих уравнений передачи тепла и массы:

$$m_s \frac{dX_m}{dt} = -k_g A_s (p_{vs} - p_{vg}); \quad (4.4)$$

$$m_s C_p \frac{dT}{dt} = h_g A_s (T_g - T_s) - k_g (p_{vs} - p_{vg}) A_s \Delta H_v, \quad (4.5)$$

где  $C_p$  — удельная теплоемкость сухой массы продукта;  $\Delta H_v$  — тепло испарения воды при температуре сушки.

При достижении температуры влажного термометра уравнения (4.4) и (4.5) могут быть объединены, в результате чего получается известное уравнение для влажного термометра:

$$\frac{dX_m}{dt} = -\frac{k_g A_s (p_{vwp} - p_{vg})}{m_s} = -\frac{k_g A_s (T_g - T_{wb})}{m_s \Delta H_v}. \quad (4.6)$$

Первоначальный этап управляемой извне сушки встречается, в частности, у пищевых продуктов с большим содержанием влаги. В этом случае на протяжении данного этапа для повышения интенсивности процесса возможно использование более высоких температур воздуха, поскольку температура продукта остается близкой к температуре влажного термометра. Любая интенсификация конвективной передачи тепла и массы за счет увеличения скорости воздуха или турбулентности увеличивает скорость испарения и сокращает продолжительность сушки.

В этом случае необходимо избегать образования сухой корочки на поверхности, а также растрескивания поверхности, что возможно при сушке макаронных изделий, а также некоторых овощей и фруктов. Этого можно достичь за счет снижения скорости или увеличения относительной влажности используемого для сушки воздуха.

## 4.2.4 Диффузионная модель

На протяжении десятилетий занятые в пищевой промышленности инженеры и ученые считали, что для некоторых пищевых продуктов уравнения диффузии соответствуют экспериментальным кривым сушки. В 1988 г. была разработана законченная теория сушки ячеистых материалов, основанная на активности воды (в качестве движущей силы) [11]. Был сделан вывод, что вышеизложенные механизмы перемещения воды могут быть объединены в уравнение, аналогичное диффузионному:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla_z (D_{eff} \nabla_z X), \quad (4.7)$$

где  $D_{eff}$  — действительный коэффициент передачи;  $z$  — безразмерная координата в высушиваемом твердом теле.

Этот результат объясняет использовавшиеся ранее упрощенные подходы к проблеме, которые предполагали, что закон Фика (*Fick*) может применяться к перемещению воды в пищевых продуктах независимо от фактических механизмов ее передачи.

Зависимость коэффициента кажущейся или фактической диффузии от температуры или содержания влаги обычно выражается уравнением Аррениуса (*Arrhenius*):

$$D_{eff} = D_0(X) \exp \left[ \frac{\Delta E_d(X)}{RT} \right], \quad (4.8)$$

где  $\Delta E_d$  — энергия активации данного диффузионного процесса; значения  $D_{eff}$  для некоторых пищевых продуктов при различном содержании влаги приведены в работах [7] и [26].

Аналитические решения уравнения 4.7 с различными граничными условиями одномерного потока для тел правильной формы и установившихся условий приведены в работе [10]. Решения для продукта в виде пластины следующее:

- внутренний массоперенос:

$$\frac{X_m - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} \exp \left[ -\frac{(2i+1)^2}{4L_p^2} \pi^2 D_{eff} (t - t_0) \right]; \quad (4.9)$$

- с учетом внутреннего и внешнего сопротивления переносу:

$$\frac{X_m - X_e}{X_0 - X_e} = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{2Bi^2}{\lambda_i^2 + Bi^2 + Bi} \exp \left[ \frac{\lambda_i^2 D_{eff}}{L_p^2} (t - t_0) \right], \quad (4.10)$$

где  $L_p$  — половина толщины пластины; параметры  $\lambda_i$  — корни характеристического уравнения  $\tan \lambda_i = Bi/\lambda_i$ ;  $Bi$  — число Био для передачи массы, определяемое следующим образом:

$$Bi = \frac{k_g L_p}{\rho_s D_{eff} (\partial X / \partial P_v)_t}. \quad (4.11)$$

Необходимо заметить, что из-за усадки и зависимости  $D_{eff}$  от температуры и содержания воды использование этих решений для прогнозирования интенсивности сушки ограничено конкретными условиями. Тем не менее их часто применяют для получения аппроксимированных значений кинетики сушки. Для решения приведенных выше дифференциальных уравнений в частных производных необходимо использование численных методов, обеспечивающих более точные расчеты. С учетом внешнего массообмена время сушки, необходимое для достижения заданного содержания воды, приблизительно пропорционально характерному линейному размеру частицы. Когда сильно влияет внутренняя диффузия, время сушки изменяется пропорционально квадрату толщины материала.

В литературе, описывающей процесс сушки зерновых культур, вместо  $D_{eff}$  используют постоянную интенсивности сушки  $K_{eff}$ , которая характеризует экспериментальные данные по изменению со временем безразмерного среднего содержания воды в некоторой частице, находящейся в плотном или псевдоожигенном слое,

$$\frac{X_m - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-K_{eff} t). \quad (4.12)$$

Этот упрощенный подход наряду с другими эмпирически полученными уравнениями, применяемыми для продуктов, получили название «уравнения тонкого слоя». Значения  $K_{eff}$  для различных зерновых культур приводятся в работе [6].

### 4.2.5 Характеристическая кривая сушки

На основании того, что для каждого материала возможно получение нормализованной кривой сушки, был разработан метод работы с обобщенным параметром, известным как характеристическая кривая сушки [40]. Научные основы и способы применения этой модели подробно рассмотрены в работах [17, 18 и 20]. Данная модель основывается на нормализованной интенсивности испарения  $f$ , характерной для каждого подвергающегося сушке продукта, в результате чего

$$n_w = f \left( \frac{X_m - X_e}{X_{cr} - X_e} \right) n_{wc}, \quad (4.13)$$

где  $n_{wc}$  — максимальная интенсивность испарения в период постоянной скорости сушки; функция  $f$  не зависит от условий сушки, а зависит только от влагосодержания.

Трудность применения данного метода при работе с пищевыми продуктами заключается в том, что во многих случаях период постоянной скорости сушки отсутствует, а критическое содержание влаги  $X_{cr}$  не определяется. Для оценки значения  $n_{wc}$  в работе [14] было предложено использовать теоретические расчеты свободного испарения. Не так давно [30] данная формула была распространена на сжимающиеся пищевые продукты, и было выведено следующее выражение для  $n_w$ :

$$n_w = \frac{k_g [p_v - p_{vg}]}{[1 + (\theta / X_0) Bi]}. \quad (4.14)$$

Теоретические выводы и экспериментальные данные показали, что «обобщенный параметр сушки» не зависит от условий сушки, геометрии частицы и подвергающегося сушке пищевого продукта, представляя собой исключительно функцию содержания воды.

### 4.2.6 Модель отступающего фронта

Экспериментальные наблюдения показали, что в процессе сушки некоторых пищевых продуктов испарение происходит внутри материала на определенной глубине, разделяющей систему на два участка (рис. 4.4). На сухом внешнем участке влага находится исключительно в парообразной фазе, а в увлажненной сердцевине — в жидкой или смешанной форме. В ходе сушки фронт испарения отступает, увеличивая отношение сухих участков к влажным.

Решение данной задачи, называемой также задачей Стефана (*Stefan*), требует одновременного решения связанных между собой уравнений передачи массы и тепла на обоих участках. Из-за значительного сопротивления сухого участка изменениями температуры и влаги на влажном участке можно пренебречь. Кроме того, можно также пренебречь тепло- и влагоемкостью на сухом участке. При этих условиях получаются следующие упрощенные уравнения тепло- и массопередачи:

$$m_s \frac{dX_m}{dt} = -K_g A_s (p_{vm} - p_{vg}); \quad (4.15)$$



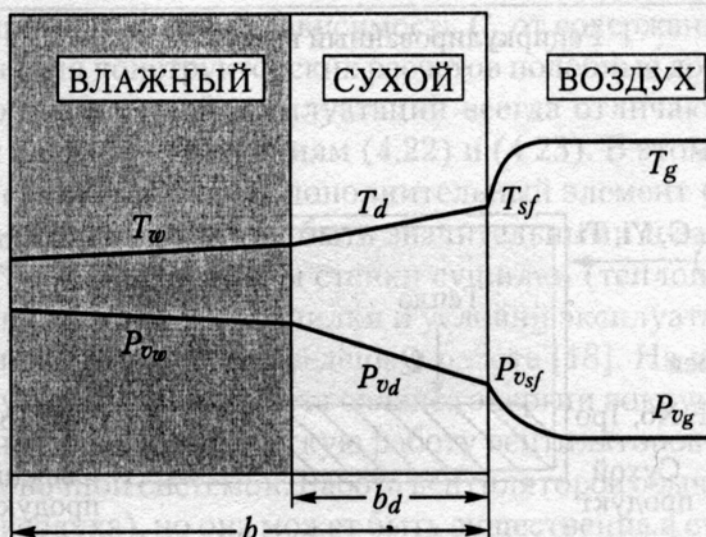


Рис. 4.4. Схема модели отступающего фронта

$$m_s C_p \frac{dT}{dt} = U_g A_s (T_g - T_w) = K_g (p_{vw} - p_{vg}) A_s \Delta H_v. \quad (4.16)$$

Общие коэффициенты тепло- и массопередачи определяются следующим образом:

$$K_g = \frac{k_g}{1 + \frac{k_g b_d}{\rho_p (\partial X / \partial P_w) D_d}}; \quad (4.17)$$

$$U = \frac{h_g}{1 + h_g b_d / k_d}, \quad (4.18)$$

где  $D_d$  и  $k_d$  — действительный коэффициент диффузии и теплопроводность.

Фактическая толщина сухого участка может быть соотнесена с содержанием влаги следующим образом:

$$\frac{b_d}{d} = 1 - \frac{X_m - X_e}{X_0 - X_e}. \quad (4.19)$$

Модели отступающего фронта с успехом могут быть использованы для сублимационной и распылительной сушки пищевых продуктов.

### 4.3 Балансы массы и энергии

Использование балансов массы и энергии обычно дает важную информацию о работе сушильного аппарата и параметрах его конструкции. Упрощенное отображение этого процесса представлено на рис. 4.5. Несмотря на то что на рисунке представле-



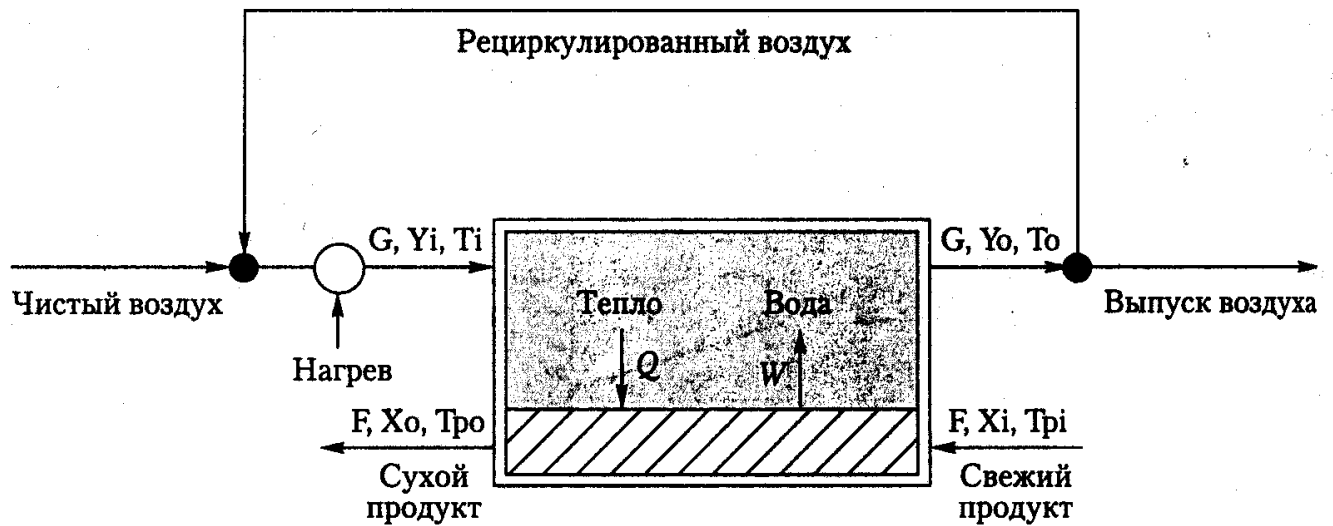


Рис. 4.5. Схема процесса сушки

на непрерывная противоточная система, представленный далее анализ относится также и к системам с потоками в одном направлении, и к отдельным этапам сушки.

Обычно состав и удельные потоки для удобства считают на сухую массу. Таким образом, переменными, имеющими отношение к сухому веществу, являются расход  $F$  (кг абсолютного сухого вещества, СВ) и влагосодержание  $X$  (кг воды/кг СВ), тогда как переменными сушильного агента являются расход  $G$  (кг сухого воздуха) и влагосодержание  $Y$  (кг пара/кг сухого воздуха). Пренебрегая потерей сухого вещества и утечкой воздуха,  $F$  и  $G$  остаются постоянными на протяжении всего процесса сушки.

Если  $W$  представляет собой общее количество воды, удаляемое из пищевых продуктов в воздух, то балансы влажности выражаются следующим образом:

$$\text{сухое вещество} \quad W = F(X_i - X_o); \quad (4.20)$$

$$\text{воздух} \quad W = G(Y_o - Y_i), \quad (4.21)$$

где индексы  $i$  и  $o$  означают соответственно впуск (*inlet*) и выпуск (*outlet*).

Балансы энергии с учетом энтальпии и температур дают:

$$\text{сухое вещество} \quad Q = FC_{po}(T_{po} - T_{pi}) + W[\Delta H_v - C_w(T_{pi} - T_r)]; \quad (4.22)$$

$$\text{воздух} \quad Q = GC_{hi}(T_{Gi} - T_{Go}) - WC_v(T_{Go} - T_r), \quad (4.23)$$

где  $Q$  — количество энергии, переданной от воздуха высушиваемому продукту;  $L_p$  — теплоемкость сухого вещества;  $C_h$  — теплосодержание влажного воздуха, определяемое следующим образом:

$$C_h = C_g + C_v Y. \quad (4.24)$$

В приведенных выше уравнениях  $\Delta H_v$  представляет собой тепло испарения воды при температуре  $T_r$ , тогда как  $C_w$ ,  $C_g$  и  $C_v$  — удельные теплоемкости жидкой воды, сухого воздуха и водяного пара. Для практических целей возможно использование следующих значений:  $\Delta H_v = 2443$  кДж/кг при  $25^\circ\text{C}$ ;  $C_w = 4,197$  кДж/(кг · К) и  $C_v = 1,876$  кДж/(кг · К). При выводе уравнений (4.22) и (4.23) общее тепло сушки

было аппроксимировано до  $\Delta H_v$ , а зависимость  $C_p$  от содержания влаги рассматривалась как линейная (для конструкторских расчетов подобные допущения приемлемы).

Результаты промышленной эксплуатации всегда отличаются от теоретических балансов энергии согласно уравнениям (4.22) и (4.23). В этом случае в левую часть уравнения (4.23) следует добавить дополнительный элемент  $Q_1$ , обозначающий потери тепла. Эти теплотери могут быть значительными и зависят от свойств того материала, из которого изготовлены стенки сушилки (теплопроводности и степень теплового излучения), размеров сушилки и условий эксплуатации. Примерные значения для оценки теплотерь приведены в работе [18]. На практике потери тепла могут быть обнаружены путем расчета баланса энергии вокруг сушильного агрегата. Следует также учитывать механическую работу вентиляторов и энергию, рассеиваемую транспортировочной системой. Работа вентиляторов обычно невелика (даже для циркулирования воздуха), но она может быть существенна в сушилках с псевдоожиженным слоем и сушилках для сушки во взвешенном состоянии. В общем случае количество энергии, необходимой для транспортировки сухих веществ в ленточных сушилках непрерывного действия, относительно невелико, хотя в барабанных сушилках оно может быть значительным.

### 4.3.1 Пример 1

Для высушивания 500 кг/ч влажных ломтиков картофеля с содержанием влаги от 78% до 8% используется противоточная сушилка. Температура поступающего в сушилку и покидающего ее продукта составляет 45 и 80 °С соответственно. Воздух при 20 °С и 30%-ной относительной влажности нагревается до 90 °С перед поступлением в сушилку с производительностью 28 000 кг/ч: Удельная теплоемкость сухого продукта составляет 1,85 кДж/(кг · К). Необходимо рассчитать температуру выпускаемого воздуха.

Расход по сухому веществу  $F$  составляет:

$$F = 500 \cdot (1 - 0,78) = 110 \text{ кг/ч},$$

а влагосодержание равно:

$$X_i = 0,78/(1 - 0,78) = 3,545 \text{ кг}_w/\text{кг}_s;$$

$$X_o = 0,08/(1 - 0,08) = 0,087 \text{ кг}_w/\text{кг}_s.$$

Исходя из психрометрических расчетов и принимая во внимание атмосферное давление, получается, что влагосодержание и удельная теплоемкость используемого для сушки воздуха составляют  $Y_i = 0,0043 \text{ кг}_w/\text{кг}_g$  и  $C_h = 1,015 \text{ кДж}/(\text{кг}_g \cdot \text{К})$ . Расход сухого воздуха составляет:

$$G = 28\,000/(1 + 0,0043) = 27\,880 \text{ кг/ч}.$$

Тепло, необходимое для повышения температуры с 20 до 90 °С, определяется следующим образом:

$$Q_h = 27\,880 \cdot 1,015 \cdot (90 - 20) = 1,839 \cdot 10^6 \text{ кДж/ч}.$$

Интенсивность испарения и тепловая нагрузка могут быть получены из формул (4.20) и (4.22):

$$W = 110 \cdot (3,545 - 0,087) = 380,4 \text{ кг}_w/\text{ч};$$

$$Q = 110 \cdot 1,85 \cdot (80 - 45) + 380,4 \cdot [2443 - 4,197 \cdot (45 - 25)] = \\ = 7,121 + 897,006 = 904,127 \text{ кДж/ч}.$$

Видно, что наибольшее количество тепла используется для испарения воды и только 49% тепла поступающего воздуха используется в процессе сушки.

Из уравнений (4.21) и (4.23) можно рассчитать влажность и температуру воздуха на выходе:

$$Y_o = Y_1 + W/G = 0,0043 + 380,4/27,880 = 0,0179 \text{ кг}_v/\text{кг}_g;$$

$$T_{Go} = (GC_{hi}T_{Gi} + WC_vT_r - Q)/(GC_{hi} + WC_v) = \\ = (2\,546\,838 + 17\,841 - 904\,127)/(28\,298 + 714) = 57,2 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Относительная влажность воздуха составляет 16,2%, что является очень низким значением, указывающим, что для оптимизации технологического процесса часть выходящего воздуха могла бы быть подмешана к воздуху, подающемуся в сушилку.

### 4.3.2 Смешивание воздушных потоков

Смешивание воздушных потоков широко используется в сушильных установках с рециркуляцией. Рассмотрим два адиабатически смешиваемых воздушных потока в различных условиях (рис. 4.6а) для получения общего выходного потока. Если предположить, что  $G_2$  представляет собой рециркуляционный поток, то коэффициент рециркуляции может быть определен как  $r = G_2/G_o$ .

С учетом  $r$  балансы массы и энергии можно записать:

$$\text{сухой газ} \quad G_o = G_1 + G_2; \quad (4.25)$$

$$\text{влажность} \quad Y_o = (1 - r)Y_1 + rY_2; \quad (4.26)$$

$$\text{температура} \quad T_o = \frac{(1 - r)C_{h1}T_1 + rC_{h2}T_2}{C_{ho}}. \quad (4.27)$$

#### 4.3.2.1 Пример 2

Насыщенный воздух при  $45 \text{ }^\circ\text{C}$  рециркулируется и смешивается с тремя частями окружающего воздуха с 30%-ной относительной влажностью при  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Найти свойства смеси.

Влагосодержания воздуха следующие:  $Y_1 = 0,0043 \text{ кг}_v/\text{кг}_g$  и  $Y_2 = 0,0649 \text{ кг}_v/\text{кг}_g$ . Коэффициент рециркуляции  $r = 0,25$  и из уравнения (4.26) получается, что

$$Y_o = (0,75 \cdot 0,0043 + 0,25 \cdot 0,0649) = 0,0195 \text{ кг}_v/\text{кг}_g$$

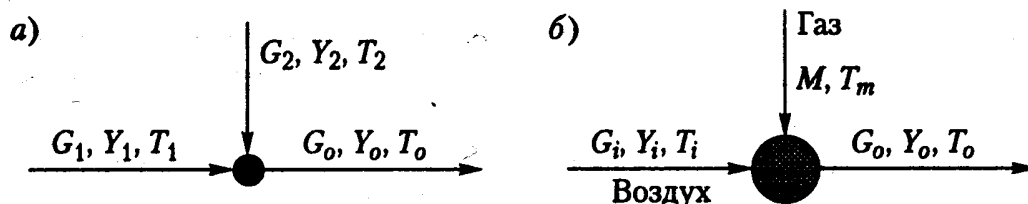


Рис. 4.6. Смешивание и сгорание: а) смесь воздуха; б) сгорание газа

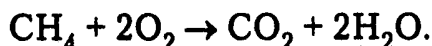
С помощью уравнения (4.24) получаем, что  $C_{h1} = 1,015$ ,  $C_{h2} = 1,129$  и  $C_{h0} = 1,043$  кДж/(кг<sub>г</sub> · К). Из уравнения (4.27) следует, что

$$T_o = (0,75 \cdot 1,015 \cdot 20 + 0,25 \cdot 1,129 \cdot 45) / 1,043 = 26,8 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Соответствующая относительная влажность смеси составляет 87,5%.

### 4.3.3 Сгорание газа

Несмотря на то что нагрев воздуха, используемого для сушки, может осуществляться разными способами, например, за счет электрического или парового нагрева, на практике обычно используется сгорание топлива. При этом дымовые газы вступают в непосредственный контакт с высушиваемым продуктом. Практически единственным топливом, используемым в пищевой промышленности, является природный газ — из-за его низкой цены и чистого сгорания. Для проведения конструкторских расчетов допустимо предположить, что природный газ состоит на 100% из метана, а молярный состав сухого воздуха представляет собой 79% N<sub>2</sub> и 21% O<sub>2</sub>. Реакция сгорания представляется в виде



На практике сгорание осуществляется с использованием количества влажного воздуха, превышающего стехиометрические требования (17,13 кг сухого воздуха/кг метана), и пропусканием сушильного воздуха через систему сгорания. Для практических расчетов теплосодержания (энтальпии) и других психрометрических свойств газы сгорания могут рассматриваться как воздух [18].

Записав балансы энергии и массы к процессу сгорания (см. рис. 4.6б), получим:

$$\text{сухой газ: } G_o = G_i - 1,25 M; \quad (4.28)$$

$$\text{влажность: } Y_o = \frac{G_i Y_i + 2,25 M}{G_o}; \quad (4.29)$$

$$\text{температура: } T_o = T_i + \frac{M[\Delta H_c + C_m(T_m - T_r) - 2,96(T_i - T_r)] - Q_1}{G_o C_{h0}}. \quad (4.30)$$

Стандартная теплота сгорания и удельная теплоемкость метана при температуре  $T_r = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$  составляет  $\Delta H_c = 49\,908$  кДж/кг и  $C_m = 2,30$  кДж/(кг · К) [27]. Тепло  $Q_1$  в уравнении (4.30) отражает тепловые потери в установке сгорания.

Если нужно рассчитать необходимое количество природного газа для достижения заданной температуры, используя уравнение баланса энергии получим:

$$M = \frac{G_i C_{hi}(T_o - T_i) + Q_1}{[\Delta H_c + C_m(T_m - T_r) - 2,96(T_o - T_r)]} \quad (4.31)$$

#### 4.3.3.1 Пример 3

Атмосферный воздух, имеющий температуру 20 °С и относительную влажность 30% ( $Y_i = 0,0043 \text{ кг}_v/\text{кг}_g$ ), следует нагреть до температуры 90 °С за счет прямого сжигания природного газа (метана). Необходимо сосчитать минимально необходимое количество метана и определить состав получающегося воздуха. Предположив, что температура метана равна 25 °С, и пренебрегая потерями тепла, из уравнения (4.31) получаем:

$$\begin{aligned} M/G_i &= 1015 \cdot (90 - 20) / [49\,908 - 2,96 \cdot (90 - 25)] = \\ &= 0,00143 \text{ кг метана/кг сухого воздуха.} \end{aligned}$$

Из уравнений (4.29) и (4.30)

$$G_o/G_i = 1 - 1,25 \cdot 0,00143 = 0,9982;$$

$$Y_o = (0,0043 + 2,25 \cdot 0,00143) / 0,9982 = 0,0075 \text{ кг}_v/\text{кг}_g$$

Существенное увеличение влажности воздуха наблюдается за счет получаемой в результате реакции сгорания воды. Если в примере 4.1 рассматривать непосредственный (прямой) нагрев, то получим  $M = 39,9 \text{ кг}_m$ , а влажность выходящего воздуха —  $Y_o = 0,0211 \text{ кг}_v/\text{кг}_g$

### 4.3.4 Интенсивность воздушного потока

Теоретически минимальная интенсивность воздушного потока соответствует ситуации, когда выходящий воздух находится в равновесии с продуктом (насыщенным в случае наличия несвязанной воды). Исходя из уравнений (4.20) и (4.21), отношение газа к сухому веществу составляет

$$\frac{G_{\min}}{F} = \frac{X_i - X_o}{Y_o^* - Y_i} = \frac{\Delta X}{\Delta Y^*} \quad (4.32)$$

Тем не менее в большинстве типичных для сушки пищевых продуктов ситуаций расход газа определяется потребностью в тепле. С помощью уравнений (4.20)–(4.24) с достаточной точностью можно записать:

$$\frac{G}{F} = \frac{\Delta H_p(X_i - X_o)}{C_g(T_{Gi} - T_{Go}^*)} = 2425 \frac{\Delta X}{\Delta T_G^*} \quad (4.33)$$

Поскольку  $\Delta X/\Delta T_G^*$  как правило, варьируется от 0,01 до 0,1, то результирующий поток воздуха на два-три порядка выше, чем поток сухого вещества. На практике экономичность процесса может быть повышена за счет 1) рециркуляции части использован-

ного воздуха, 2) увеличения температуры сушильного агента (воздуха) и 3) использования многоступенчатого сушильного агрегата с внутренним нагревом и рециркуляцией.

#### 4.3.4.1 Пример 4

Для приведенной в примере 1 ситуации проанализируем различные варианты технологического процесса.

1. *Рассчитать минимальный расход воздуха, необходимый для сушки продукта.* Можно предположить, что при идеальных условиях выходящие потоки находятся в термическом равновесии с потоками, поступающими в систему. Это означает, что  $T_{p_0} = 90^\circ\text{C}$  и  $T_{G_0} = 45^\circ\text{C}$ .

Грубую оценку расхода воздуха можно получить из уравнения (4.33):

$$G_{\min} = 110 \cdot 2425 \cdot (3,545 - 0,087)/(90 - 45) = 20,499 \text{ кДж/ч.}$$

Баланс энергии, полученный из уравнения (4.23), может быть использован для расчета минимального расхода воздуха. Из уравнения (4.22) потребность в тепле высчитывается следующим образом:

$$Q = 110 \cdot 1,85 \cdot (90 - 45) + 380,4 \cdot [2442 - 4,197 \cdot (45 - 25)] = 906\,164 \text{ кДж/ч.}$$

Таким образом,

$$G_{\min} = [Q + WC_v(T_{G_0} - T_r)]/[C_{hi}(T_{Gi} - T_{Go})] = \\ = (906\,164 + 380,4 \cdot 1,876 \cdot 20)/(1,015 \cdot 45) = 20\,152 \text{ кДж/ч.}$$

Влажность на выходе рассчитывается с использованием уравнения (4.21):

$$Y_o = 0,0043 + 380,4/20\,152 = 0,0232 \text{ кг}_v/\text{кг}_g.$$

Тепло, необходимое для нагрева воздуха, равно

$$Q_h = 20\,152 \cdot 1,015 \cdot (90 - 20) = 1,432 \cdot 10^6 \text{ кДж/ч.}$$

Обратите внимание, что количество воздуха, использованное в примере 1, всего на 39% больше, чем минимальный теоретический расход. В приведенных выше расчетах рассматривался косвенный нагрев. Результаты непосредственного нагрева (см. пример 3) приведены в табл. 4.3.

При упрощенном расчете (с использованием уравнения 4.33) прогнозируемый расход примерно на 2% больше. Окончательные относительные влажности далеки от значения насыщения при  $45^\circ\text{C}$  ( $0,0649 \text{ кг}_v/\text{кг}_g$ ), свидетельствуя, что в этом случае расход газа определяется потребностью в тепле.

2. *Оценить максимальное количества выходящего воздуха, который может быть рециркулирован.* В идеальных условиях выходящий воздух находится в равновесии с поступающим продуктом, и это означает, что  $T_{G_0} = 45^\circ\text{C}$  и  $Y_o = 0,0649 \text{ кг}_v/\text{кг}_g$  (если равновесная активность воды примерно равна единице).

Поскольку влажность поступающего в сушилку воздуха неизвестна, то для расчета минимального расхода воздуха используется уравнение (4.23) после перевода в  $C_{ho}$ :

$$G_{\min} = [Q + WC_v(T_{Gi} - T_r)]/[C_{ho}(T_{Gi} - T_{Go})] = \\ = (906\,164 + 380,4 \cdot 1,876 \cdot 65)/(1,129 \cdot 45) = 18\,749 \text{ кг}_g/\text{ч.}$$

Таблица 4.3. Расчеты для примера 4

$G_i$ (кг <sub>г</sub> /ч)	$r$ (—)	$Q_h$ (10 <sup>6</sup> кДж/ч)	$M$ (кг <sub>м</sub> /ч)	$T_o$ (°C)	$Y_o$ (кг <sub>в</sub> /кг <sub>г</sub> )
<b>Базовые величины</b>					
27 880	—	1,839	—	57,2	0,0179
27 880	—	—	39,9	57,2	0,0221
<b>Конкретные величины</b>					
20 152	—	1,432	—	45,0	0,0233
20 116	—	—	28,5	45,0	0,0266
19 960	0,212	1,320	—	45,0	0,0285
19 728	0,371	1,235	—	45,0	0,0350
19 191	0,576	1,124	—	45,0	0,0510
18 749	0,665	1,080	—	45,0	0,0649
6277	—	1,080	—	45,0	0,0649
7103	—	—	22,2	45,0	0,0649

и теперь влажность на входе выводится из уравнения (4.21):

$$Y_i = 0,0649 - 380,4/18\,749 = 0,0446 \text{ кг}_v/\text{кг}_g.$$

Обратите внимание, что из-за более высокой влажности количество сухого воздуха меньше, чем в предыдущем случае. Балансы массы в смесях воздушного потока (уравнение 4.26) позволяют рассчитать коэффициент рециркуляции:

$$r = (Y_i - Y_1)/(Y_2 - Y_1) = (0,0446 - 0,0043)/(0,0649 - 0,0043) = 0,665.$$

Из уравнения (4.27) может быть получена температура смеси  $T = 37,2^\circ\text{C}$ . Здесь необходимо быть внимательным, поскольку получающиеся условия соответствуют перенасыщенному воздуху, что, в свою очередь, указывает на то, что до смешивания поток воздуха необходимо нагреть во избежание конденсации.

Общая потребность в тепле в этом случае составляет:

$$Q_h = 18\,749 \cdot (0,335 \cdot 1,015 \cdot 70 + 0,665 \cdot 1,129 \cdot 45) = 1,08 \cdot 10^6 \text{ кДж/ч}.$$

Теоретически возможна рециркуляция до 66,5% выходящего воздуха, что позволило бы добиться экономии потребляемой энергии на 24,5%. Результаты расчета балансов для различных значений коэффициента рециркуляции представлены в табл. 4.3.

3. *Определить минимальный расход воздуха при отсутствии ограничений по температуре сушильного агента.* Если предположить наличие равновесности, то расход можно рассчитать следующим образом (уравнение 4.32):

$$G_{\min} = F(X_i - X_o)/(Y_o - Y_i) = 110 \cdot (3,545 - 0,087)/(0,0649 - 0,0043) = 6,277 \text{ кг/ч},$$

а температура на входе (уравнение 4.23) будет равна

$$T_{G_i} = 45 + (906\,164 + 380,4 \cdot 1,876 \cdot 20) / (6277 \cdot 1,015) = 189,5 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Тепло, необходимое для достижения расчетной температуры воздуха, равно

$$Q_h = 6277 \cdot 1,015 \cdot (189,5 - 20) = 1,08 \cdot 10^6 \text{ кДж/ч}.$$

Таким образом, для удовлетворения той же потребности в тепле температура на входе при минимальном расходе воздуха должна быть на  $99,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  выше. Следует обратить внимание на то, что рециркуляция и перегрев позволяют добиться одинаковых результатов в экономии энергии, но в первом случае наблюдается снижение движущей силы, тогда как во втором случае температура на входе выше, а скорость воздуха внутри сушилки ниже. Результаты данного раздела могут применяться и для случаев внешнего нагрева с той лишь разницей, что часть тепла (то есть примерно 59%) должна подаваться от нагревателей, размещенных внутри сушилки. Еще раз повторим, что эти расчеты имеют место для косвенного нагрева. Расчеты же, соответствующие непосредственному сгоранию и требующие одновременного решения задач балансов в сушилке и печи, приводятся в табл. 4.3.

Балансы массы и энергии в пространстве вокруг сушилки, а также изучение предельных ситуаций могут оказаться очень полезными для разработки и усовершенствования процесса сушки. Очевидно, что условий, рассматривавшихся в вышеприведенных примерах, можно добиться только при работе с неким идеальным сушильным агрегатом (бесконечно длинным и полностью изолированным).

На практике часть влажного воздуха может быть рециркулирована для экономии тепла в сушильном агрегате. При увеличении коэффициента рециркуляции  $r$  уменьшается потребность в тепле или потребление газа в нагревателе. Поскольку вместе с коэффициентом рециркуляции  $r$  увеличивается и влажность воздуха, рециркуляция снижает движущую силу в сушилке, и чтобы добиться сушки с той же интенсивностью может потребоваться оборудование большего размера. Довольно часто продолжительность пребывания пищевых продуктов в сушилке определяется в основном интенсивностью внутреннего перемещения воды в сухом веществе, что позволяет рециркулировать часть выпускного воздуха. Кроме того, рециркуляция влажного воздуха ограничена необходимостью предотвращения конденсации на холодных участках.

Работа при более высоких температурах, увеличивающих потери тепла, обычно ограничивается чувствительностью большинства пищевых продуктов к нагреву. В противотоке температура пищевого продукта может приближаться к температуре входящего горячего воздуха, результатом чего становится термическое повреждение продукта. В параллельном потоке конечная температура и содержание воды в продукте ограничены состоянием воздуха, выходящим из сушильного агрегата. Таким образом, использование относительно высоких температур приемлемо только в условиях очень высокой интенсивности испарения или же в системах с потоками в одном направлении — например, в сушилках для сушки во взвешенном состоянии.

В случае возможности такого решения лучшими вариантами зачастую бывают системы с внутренним нагревом и рециркуляцией или же многоступенчатые системы. Такая сушка обеспечивает более равномерный технологический процесс, луч-



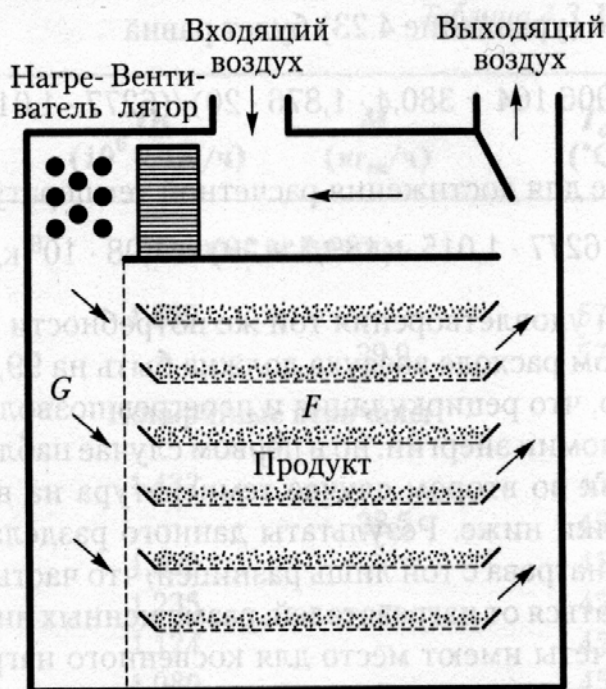


Рис. 4.7. Лотковая сушилка (сушильный шкаф)

шую возможность управления температурой, а также значительное снижение количества потребляемой энергии. Во всех случаях необходимо принимать во внимание как капитальные затраты, так и стоимость энергии, добиваясь при этом оптимального качества продукции.

## 4.4 Варианты применения

В этом разделе основное внимание будет уделено вариантам применения рассматривавшихся выше моделей и процедурам, касающимся некоторых общепринятых промышленных систем сушки. Речь пойдет о лотковых, ленточных, барабанных и пневматических сушилках. Так как особое внимание мы уделяем необходимости моделирования и оптимизации конструирования сушильных агрегатов для пищевой промышленности, то ниже представлены модели, позволяющие осуществлять моделирование и проводить расчеты при конструировании. Вместе с тем мы не будем рассматривать решения, которые потребовали бы применения численных методов и компьютеров. Вместо этого мы приводим примеры некоторых упрощенных расчетов, а также описания некоторых вариантов практического применения.

### 4.4.1 Лотковые сушилки или сушильные шкафы

Лотковая сушилка или сушильный шкаф упрощенно изображена на рис. 4.7 и представляет собой наиболее простое сушильное оборудование, являющееся типичным примером процесса периодической обработки. Такие сушилки позволяют осуществлять обработку различных пищевых продуктов (от суспензии до твердых сформов-

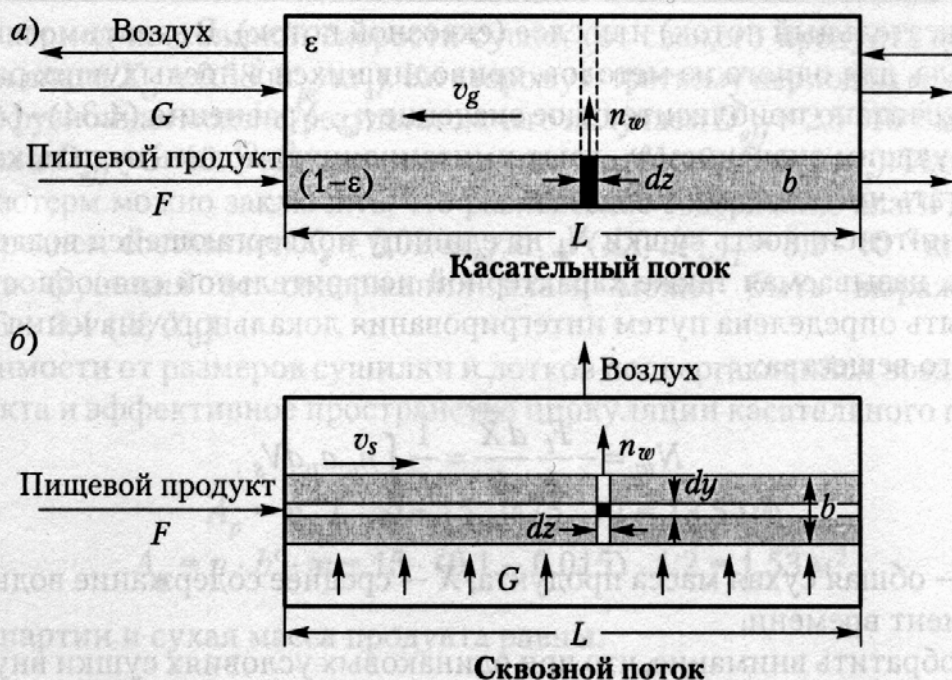


Рис. 4.8. Схематическое изображение задачи сушки:

а) касательный поток; б) сквозной поток

ванных продуктов) с одновременным регулированием условий сушки. Подвергающийся сушке материал укладывается относительно тонкими слоями (толщиной от 1 до 6 см) на лотки, которые загружаются в сушильный шкаф. Затем воздух нагревается и циркулирует между лотками («касательный поток»), и реже — проходит сквозь высушиваемый материал, что достигается за счет использования перфорированных лотков («сквозной поток»).

Смоделировать процесс периодической сушки достаточно сложно. Схематическое изображение этой задачи приведено на рис. 4.8. При периодической сушке лоток остается неподвижным. Состояние продукта и воздуха изменяются во времени и по координате, поскольку потенциал сушильного воздуха уменьшается по направлению потока. Упрощенные балансы массы и энергии относительно изменяющегося объема данного слоя могут быть выражены следующим образом:

$$-\rho_s(1-\varepsilon)\frac{\partial X}{\partial t} = \rho_g \varepsilon v_g \frac{\partial Y}{\partial r}; \quad (4.34)$$

$$-\rho_s(1-\varepsilon)\frac{\partial X}{\partial t} = n_w a_v; \quad (4.35)$$

$$\rho_s(1-\varepsilon)C_p \frac{\partial T_p}{\partial t} + n_w a_v \Delta H_v = -\rho_g \varepsilon v_g C_h \frac{\partial T_G}{\partial r}; \quad (4.36)$$

$$-\rho_g \varepsilon v_g C_h \frac{\partial T_G}{\partial r} = h_g a_v (T_G - T_p), \quad (4.37)$$

где  $r$  — длина в направлении движения потока воздуха (глубина лотка  $z$  для касательного потока и толщина слоя  $y$  — для сквозного потока);  $\varepsilon$  — доля объема воздуха

в системе (касательный поток) или слое (сквозной поток). В зависимости от поведения материала, для одного из методов, приводившихся в предыдущих разделах, может быть рассчитано приблизительное значение  $n_w$ . Уравнения (4.34)–(4.37) вместе с соответствующим значением  $n_w$  дают имитационную модель сушки, которую следует рассчитать численными методами.

Средняя интенсивность сушки  $N_w$  на единицу подвергающейся воздействию поверхности  $A$ , называемая также характерной испарительной способностью сушилки, может быть определена путем интегрирования локального значения  $n_w$  по всему объему сухого вещества:

$$N_w = -\frac{F_t}{A} \frac{d\bar{X}}{dt} = \frac{1}{A} \int_{V_s} n_w a_v dV_s. \quad (4.38)$$

Здесь  $F_t$  — общая сухая масса продукта;  $\bar{X}$  — среднее содержание воды в сушилке в любой момент времени.

Следует обратить внимание, что при одинаковых условиях сушки внутри сушилки значение  $N_w$  является функцией времени и равно  $n_w$  для касательного потока и  $n_w a_v b$  — для сквозного. Время сушки может быть рассчитано путем интегрирования уравнения (4.38):

$$\Delta t = \frac{F_t}{A} \int_{X_i}^{X_0} \frac{d\bar{X}}{N_w}. \quad (4.39)$$

С другой стороны, балансы массы и энергии для сушилки дают:

$$Y_o = Y_i + \frac{A N_w}{G}; \quad (4.40)$$

$$T_{Go} \approx T_{Gi} + \frac{Q_h - A N_w \Delta H_v}{C_{hi} G}, \quad (4.41)$$

где  $Q_h$  — тепло, подаваемое в шкаф нагревателем.

При выводе уравнения (4.41) мы пренебрегли поглощением продуктом энергии, а также теплом испаряющейся влаги.

#### 4.4.1.1 Пример 5

Пищевой продукт необходимо высушить в сушилке периодического действия таким образом, чтобы изменить его влагосодержание с  $X_i = 0,45$  кг<sub>в</sub>/кг<sub>с</sub> на  $X_o = 0,12$  кг<sub>в</sub>/кг<sub>с</sub>. Насыпная плотность влажного продукта составляет  $\rho_b = 1200$  кг/м<sup>3</sup>. Сушилка оборудована 15 лотками глубиной 1,5 см и расстоянием между ними 10 см, длиной  $L = 0,75$  м и шириной  $w = 1,2$  м. Общая подача воздуха для циркуляции касательного потока составляет 3 м<sup>3</sup>/с, а параметры поступающего воздуха поддерживаются постоянными при  $T_g = 70$  °С и  $T_{wb} = 30$  °С. Необходимо рассчитать общее время сушки.

Эксперименты в небольшом масштабе свидетельствуют, что поведение продукта в процессе сушки может быть разделено на три четко очерченных периода. Сначала на-

блюдается период постоянной скорости сушки (от свежего продукта до критического содержания влаги  $X_{cr} = 0,38 \text{ кг}_w/\text{кг}_s$ ). Ко второму и третьему периодам может быть применена диффузионная модель, результатом чего получаем  $D_{eff} = 2,5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$  для влажного участка и  $D_{eff} = 5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$  для сухого участка ( $X < 0,18 \text{ кг}_w/\text{кг}_s$ ). Из анализа сорбционных изотерм можно заключить, что равновесное содержание влаги для влажного участка в среднем составляет  $X_e = 0,02 \text{ кг}_w/\text{кг}_s$  и  $(dX/dP_w)_T = 3,2 \cdot 10^{-2} \text{ кг}_w/(\text{кг}_s \cdot \text{кПа})$ . Усадка как функция от содержания влаги может быть выражена в виде  $(b/b_0) = 0,6 + 0,4 (X/X_0)$ .

В зависимости от размеров сушилки и лотков подвергающийся воздействию участок продукта и эффективное пространство циркуляции касательного потока воздуха равны:

$$A_p = n \cdot L \cdot w = 15 \cdot 0,75 \cdot 12 = 13,5 \text{ м}^2;$$

$$A_g = n \cdot b' \cdot w = 15 \cdot (0,1 - 0,015) \cdot 1,2 = 1,53 \text{ м}^2.$$

Размер партии и сухая масса продукта равны:

$$L = \rho_b \cdot A_p \cdot b = 1200 \cdot 13,5 \cdot 0,015 = 243 \text{ кг};$$

$$F_t = F'/(1 + X_i) = 243/1,45 = 167,6 \text{ кг}.$$

На входе характеристики воздуха могут быть выражены как  $Y_i = 0,0103 \text{ кг}_v/\text{кг}_g$ ,  $\rho = 1,012 \text{ кг}/\text{м}^3$ ,  $\eta = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $k = 3 \cdot 10^{-5} \text{ кВт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ,  $C_h = 1,026 \text{ кДж}/(\text{кг}_g \cdot \text{К})$  и  $P_r = 0,7$ . Расход воздуха и его скорость на лотках (при условии равномерного распределения) равны:

$$G = G'/\rho(1 + Y_i) = 3/(1,012 \cdot 1,0103) = 2,934 \text{ кг}_g/\text{с};$$

$$v_g = G/A_g = 3/1,53 = 1,96 \text{ м}/\text{с}.$$

Для определения суммарного времени, необходимого для достижения конечного содержания влаги, следует спрогнозировать интенсивность испарения и время сушки для каждого интервала времени.

#### Первый период сушки

Помимо периода прогрева, продолжительность которого зависит от начальной температуры и которым можно пренебречь, существует некоторый период постоянной скорости сушки, в котором значение  $n_w$  может быть рассчитано по уравнению (4.6):

$$n_w = \frac{h_g(T_g - T_{wb})}{\Delta H_v}.$$

Использование полученного результата в уравнении (4.3) при условии сохранения постоянных условий внутри сушильного шкафа, что подразумевает равномерную сушку, дает:

$$\Delta t = \frac{F_t \Delta X}{A n_w} = \frac{F_t \Delta H_v}{A h_g (T_g - T_{wb})} (X_i - X_{cr}).$$



Коэффициент конвективной теплопередачи может быть получен из выражения для плоского листа (см. табл. 4.1), где  $L_p = w = 0,75$  м. В качестве аппроксимации используются характеристики воздуха при температуре сухого термометра.

$$Re = L v_g / \eta = 7,353 \cdot 10^4;$$

$$Nu = 0,664 Re^{1/2} Pr^{1/3} = 150;$$

$$H_g = Nu k / L = 0,0064 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

С учетом вышеприведенных результатов получаем:

$$n_w = 0,0064 \cdot (70 - 30) / 2430 = 1,054 \cdot 10^{-4} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$$

и

$$\Delta t_1 = 167,6 \cdot (0,45 - 0,38) / (13,5 \cdot 1,054 \cdot 10^{-4}) = 8250 \text{ с} = 2,29 \text{ ч.}$$

Из уравнений (4.40) и (4.41) можно получить данные по содержанию влаги и температуре:

$$Y_o = 0,0103 + 13,5 \cdot 1,054 \cdot 10^{-4} / 2,934 = 0,0108 \text{ кг}_v/\text{кг}_g;$$

$$T_o = 70 - 13,5 \cdot 1,054 \cdot 10^{-4} \cdot 2430 / (2,934 \cdot 1,026) = 68,85 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Следует обратить внимание на то, что приведенные расчеты соответствуют максимальной интенсивности испарения. Полученные значения  $Y_o$  и  $T_o$  указывают на то, что для данного примера предположение о сохранении постоянных условий сушки вполне приемлемо. В других случаях или при внутренней рециркуляции некоторой части воздуха и его потоке сквозь продукт, равном  $G/(1 - r)$ , для пересчета интенсивности сушки необходимо брать средние значения температуры и содержания влаги. Например, при коэффициенте рециркуляции  $r = 0,95$  расход свежего воздуха снижается до  $G = 0,147 \text{ кг}_g/\text{с}$ , что теоретически приводит к увеличению содержания влаги на выходе до  $Y_o = 0,02 \text{ кг}_v/\text{кг}_g$ . При среднем состоянии воздуха ( $Y = 0,0195 \text{ кг}_v/\text{кг}_g$  и  $T = 69,4 \text{ }^\circ\text{C}$ ) температура по влажному термометру составляет  $T_{wb} = 34,1 \text{ }^\circ\text{C}$ . В этих условиях движущая сила снижается примерно на 12%, а время, затрачиваемое на сушку, возрастает в тех же пропорциях.

### Второй период сушки

На влажном участке как внутреннее, так и внешнее сопротивление могут оказаться важными, и в этом случае следует использовать уравнение (4.10). Возможно доказательство того, что при достаточной продолжительности (обычно более 10–15 мин) первый элемент при разложении в ряд дает хорошую оценку решения, приводя к:

$$\frac{X_m - X_e}{X_{cr} - X_e} = \frac{2Bi^2 \exp \left[ -\frac{\lambda_1^2 D_{eff}}{b^2} (t - t_{cr}) \right]}{\lambda_1^2 (\lambda_1^2 + Bi^2 + Bi)}.$$

Данное уравнение может быть продифференцировано для расчета  $dX_m/dt$  и получения следующего выражения:

$$n_w = -\frac{\rho_s \lambda_1^2 D_{eff}}{a_v b^2} (X_m - X_e).$$

Таким образом, по уравнению (4.37) время сушки для второго периода задается как

$$\Delta t = \frac{b^2}{\lambda_1^2 D_{eff}} \cdot \int_{X_d}^{X_{cr}} \frac{d\bar{X}}{(\bar{X} - X_e)} = \frac{b^2}{\lambda_1^2 D_{eff}} \ln \left[ \frac{X_{cr} - X_e}{X_d - X_e} \right].$$

На протяжении этого периода среднее влагосодержание составляет  $0,28 \text{ кг}_w/\text{кг}_s$ , а средняя толщина равна:

$$b = 0,015 [0,6 + 0,4 \cdot (0,28/0,45)] = 1,273 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

Коэффициент массообмена может быть рассчитан по аналогии с теплообменом, который для условий сушки выражается следующим образом:

$$\frac{h_g}{k_g} = \frac{1,608 P_t C_h}{\beta (Pr/Sc)^{2/3}} = 150 \frac{\text{кДж} \cdot \text{кПа}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

что позволяет получить  $k_g = 4,27 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{кПа} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с})$ . Таким образом, число Био по уравнению (4.11) равно

$$Bi = 4,27 \cdot 10^{-5} \cdot 1,273 \cdot 10^2 / (828 \cdot 2,5 \cdot 10^{-9} \cdot 3,2 \cdot 10^{-2}) = 8,2.$$

Таким образом, первый корень уравнения для  $\text{tg } \lambda = Bi/\lambda$ , откуда  $\lambda_1 = 1,40$ .

При использовании этих результатов время сушки составляет

$$\Delta t_2 = (1,273/1,4)^2 / 2,5 \cdot 10^{-5} \ln [(0,38 - 0,02)/(0,18 - 0,02)] = 2,682 \cdot 10^4 \text{ с} = 7,45 \text{ ч}.$$

### Третий период сушки

В общем случае, поскольку эффективная диффузия для сухого участка почти на порядок меньше, чем для влажного, можно использовать применявшиеся на протяжении последнего периода средства расчета внутреннего массообмена, а также уравнение (4.9). Кроме того, при достаточно продолжительном времени может быть достаточен только первый член ряда, в результате чего получим

$$\frac{X_m - X_e}{X_d - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp \left[ -\frac{\pi^2 D_{eff}}{4b^2} (t - t_d) \right].$$

Отсюда  $n_w$  можно выразить как

$$n_w = \frac{\rho_s \pi^2 D_{eff}}{a_v 4b^2} (X_m - X_e),$$

а время сушки равно

$$\Delta t = \frac{4b^2}{\pi^2 D_{eff}} \int_{X_0}^{X_d} \frac{d\bar{X}}{(\bar{X} - X_e)} = \frac{4b^2}{\pi^2 D_{eff}} \ln \left[ \frac{X_d - X_e}{X_0 - X_e} \right].$$

На протяжении этого периода среднее содержание влаги составляет  $0,15 \text{ кг}_w/\text{кг}_s$ , а средняя толщина составляет

$$b = 0,015[0,6 + 0,4 \cdot (0,15/0,45)] = 1,1 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Из этого расчета время сушки равно

$$\Delta t_3 = 4(1,1/\pi)^2 / (2,5 \cdot 10^{-6}) \ln [(0,18 - 0,02)/(0,13 - 0,02)] = 4,61 \cdot 10^4 \text{ с} = 12,81 \text{ ч.}$$

В результате общее время сушки представляет собой сумму времени для трех указанных выше периодов и выражается формулой

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 = 22,55 \text{ ч.}$$

Для получения приемлемой интенсивности испарения и уменьшения неравномерности сушки лотковые сушилки требуют большого расхода воздуха. Работа с использованием касательного потока требует более высоких скоростей воздушного потока, составляющих, как правило,  $1,5 \text{ м/с}$ , тогда как работа со сквозным потоком увеличивает интенсивность испарения и требует меньшей скорости воздушного потока. Для увеличения скорости воздуха лотки необходимо укладывать плотно друг к другу, причем обычно сохраняют зазор между лотками в  $4\text{--}10 \text{ см}$ . Производительность лотковых сушилок ограничена вместимостью шкафа и относительно продолжительными циклами сушки. Для касательных потоков скорость сушки ограничена длиной в направлении потока на протяжении периода постоянной скорости сушки (из-за зависимости коэффициента теплопередачи от этой длины), а также толщиной слоя в период снижения интенсивности. В связи с этим необходимо находить компромисс между вместимостью и временем нахождения продукта в сушильном шкафу. Максимальная интенсивность испарения, как правило, находится в диапазоне от  $0,1$  до  $1,0 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ . Более высоких значений удастся добиться за счет работы с касательным потоком и использования более высоких температур.

Влажность и температура выходящего воздуха изменяются пропорционально времени в соответствии с интенсивностью испарения. На протяжении начального периода, зависящего от начальных условий, они изменяются довольно быстро, достигая критического состояния, то есть максимального значения  $Y_0$  и минимального значения  $T_0$ . Для предотвращения насыщения на этом этапе наибольшей интенсив-

ности испарения необходимо выбрать характеристики воздушного потока и коэффициент рециркуляции. После периода практической постоянности значение  $Y_0$  резко снижается, тогда как значение  $T_0$  падает постепенно, причем оба значения асимптотически приближаются к условиям на входе. Для увеличения термической эффективности часть воздуха рециркулируется, причем зачастую коэффициент рециркуляции довольно высок, составляя от 80 до 95%. В этих условиях на протяжении процесса сушки влажность воздуха на входе изменяется, а время сушки увеличивается, особенно на начальном этапе.

## 4.4.2 Туннельные и конвейерные сушилки

Туннельные и конвейерные сушилки широко используются для дегидратации пищевых продуктов, особенно фруктов и овощей. В этих сушильных агрегатах слой продукта распределяется на ленте конвейера и высушивается за счет прохождения нагретого воздуха параллельно этому слою или сквозь него. Пример типичной туннельной сушилки, которая может работать как с противотоком, так и с параллельным потоком, приведен на рис. 4.9. Материал загружается на лотки, которые укладываются на вагонетки. Эти вагонетки через определенные промежутки времени вводятся в туннель с одной стороны, проходят через него, а затем выходят с другой. Несмотря на то что туннельная сушилка работает прерывно, можно добиться полунепрерывного режима ее работы. На рис. 4.10 изображен одноступенчатый сушильный агрегат непрерывного действия в форме ленточного конвейера. Подлежащий сушке материал загружается относительно равномерным и высоким слоем, а затем передвигается по сушилке на медленно перемещающейся перфорированной ленте из нержавеющей стали. Толщина слоя (от 5 до 15 см и до 25 см на вторичных этапах) и скорость ленты (от 1 до 15 м/ч) регулируются в соответствии с условиями сушки.

Моделирование непрерывного процесса сушки требует также решения дифференциальных уравнений массо- и теплообмена внутри слоя (см. рис. 4.8). Состояние продукта и характеристики воздуха изменяются по направлению потока. В этом слу-

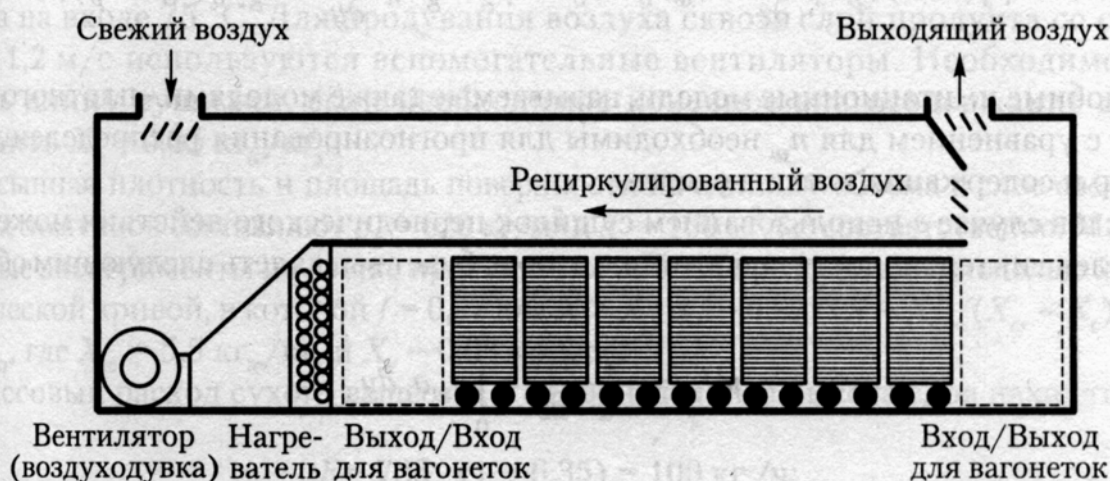


Рис. 4.9 Схема туннельной сушилки



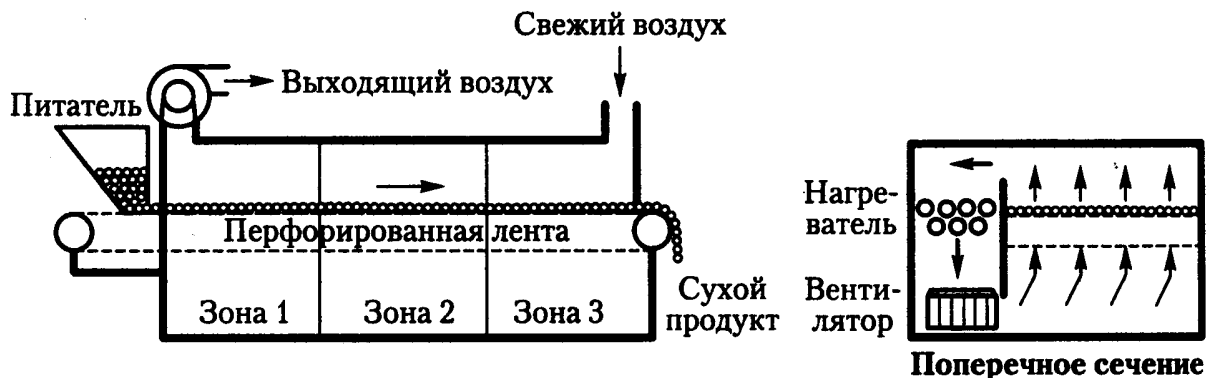


Рис. 4.10. Схема одноступенчатого конвейерного сушильного агрегата

чае при установившихся условиях упрощенные балансы массы и энергии на бесконечно малом участке слоя могут быть выражены следующим образом:

для касательной циркуляции:

$$-F \frac{\partial X}{\partial z} = \pm G \frac{dY}{dz} = n_w a_v A_1; \quad (4.42)$$

$$FC_p \frac{\partial T_p}{\partial z} + n_w a_v A_1 \Delta F = -(\pm G C_h) \frac{dT_G}{dz} = h_g a_v A_1 (T_G - T_p), \quad (4.43)$$

где  $A_1 = wb$  — участок поперечного сечения слоя; в этих уравнениях знак «+» отражает сушку в противотоке, а знак «-» — сушку в параллельном потоке.

Для сквозной циркуляции:

$$-\rho_s (1 - \epsilon) \frac{\partial X}{\partial z} = \rho_g \epsilon v_g \frac{\partial Y}{\partial y} = n_w a_v; \quad (4.44)$$

$$\rho_s (1 - \epsilon) C_p v_s \frac{\partial T_p}{\partial z} + n_w a_v \Delta H_v = -\rho_g \epsilon v_g C_h \frac{\partial T_G}{\partial y} = h_g a_v (T_G - T_p). \quad (4.45)$$

Подобные имитационные модели, называемые также моделями «плотного слоя», вместе с уравнением для  $n_w$  необходимы для прогнозирования распределения температур и содержания влаги в системе.

Как и в случае с использованием сушилок периодического действия может быть определена интенсивность испарения, которая будет выглядеть следующим образом:

$$N_w = \frac{F}{w} \frac{d\bar{X}}{dz} = \int_0^b n_w a_v dy. \quad (4.46)$$

Здесь  $F$  — подача сухого продукта;  $w$  — ширина сушилки;  $X$  — среднее влагосодержание на заданном расстоянии в сушилке.

Длина сушилки, необходимая для требуемого уменьшения влагосодержания, связана с продолжительностью сушки (скоростью ленты транспортера) и составляет:

$$\Delta z = -\frac{F}{w} \int_{X_i}^{X_0} \frac{d\bar{X}}{N_w}. \quad (4.47)$$

Общие балансы тепла и энергии в сушилке непрерывного действия рассматривались в предыдущих разделах. С учетом этого изменения влагосодержания воздуха и температуры в сушилке могут быть смоделированы как

$$Y_z = Y_i + \frac{F\Delta X}{G}; \quad (4.48)$$

$$T_{Gz} = T_{Gi} - \frac{F\Delta X\Delta H_v - FC_p\Delta T_p}{GC_{hi}}, \quad (4.49)$$

где для прямоточной сушки  $\Delta X = X_i - X_z$ ,  $\Delta T_p = T_{Pi} - T_{Pz}$ , а для противоточной сушки  $\Delta X = X_z - X_o$ ,  $\Delta T_p = T_{Pz} - T_{Po}$ . Уносом тепла испарившейся влагой, которое представляет менее 1% от общего количества переданного тепла, в уравнении (4.49) мы пренебрегли.

#### 4.4.2.1 Пример 6

Необходимо сконструировать противоточную сушилку для сушки ломтиков яблок (средний диаметр 5 см при толщине в 0,8 см). Необходимая производительность должна составить 735 кг/ч при влагосодержании  $X_i = 6,35$  кг<sub>в</sub>/кг<sub>с</sub> и температуре  $T_i = 35$  °С. Используется конвейер, ширина которого составляет 2 м, а скорость — 5,5 м/ч. Расход свежего воздуха составляет 17 500 кг/ч, причем 65% воздуха рециркулируется. Средние характеристики воздуха: 20 °С и относительная влажность 30%, температура на входе 75 °С. Для продувания воздуха сквозь слой продукта со скоростью в 1,2 м/с используются вспомогательные вентиляторы. Необходимо определить длину сушилки, если необходимое конечное влагосодержание должно составить  $X_o = 0,35$  кг<sub>в</sub>/кг<sub>с</sub>.

Насыпная плотность и площадь поверхности на единицу объема в слое свежих яблочных ломтиков составляют  $\rho_b = 620$  кг/м<sup>3</sup> и  $a_b = 160$  м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup> соответственно. Маломасштабные эксперименты по сушке продукта могут быть представлены моделью характеристической кривой, в которой  $f = 0,97$  для  $X > X_{cr}$  и  $f = 0,97 ((X - X_c)/(X_{cr} - X_c))^{1,1}$  для  $X < X_{cr}$ , где  $X_{cr} = 5,5$  кг<sub>в</sub>/кг<sub>с</sub> и  $X_c = 0,03$  кг<sub>в</sub>/кг<sub>с</sub>.

Массовый расход сухого вещества и первоначальная высота слоя находятся из:

$$F = 735 \cdot (1 + 6,35) = 100 \text{ кг/ч};$$

$$b = 735/(\rho_b v_b w_b) = 750/(620 \cdot 5,5 \cdot 2) = 0,108 \text{ м}.$$

Расходы свежего воздуха ( $Y_a = 0,0043 \text{ кг}_v/\text{кг}_g$ ) и воздуха на входе равны:

$$G_a = 17\,500 / (1 + 0,0043) = 17\,425 \text{ кг}_g/\text{ч};$$

$$G_i = 17\,425 / (1 - 0,65) = 49\,786 \text{ кг}_g/\text{ч}.$$

Исходя из общего баланса массы, влажность на выходе равна:

$$Y_o = 0,0043 + 100 (6,35 - 0,35) / 17\,425 = 0,0387 \text{ кг}_v/\text{кг}_g,$$

а из уравнения (4.26) влагосодержание воздуха на входе составляет

$$Y_i = 0,35 \cdot 0,0043 + 0,65 \cdot 0,0387 = 0,0267 \text{ кг}_v/\text{кг}_g.$$

Характеристики поступающего воздуха:  $Y_i = 0,0103 \text{ кг}_v/\text{кг}_g$ ;  $T_{wb} = 37,8^\circ\text{C}$ ;  $\rho = 0,972 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $\eta = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $k = 3 \cdot 10^{-5} \text{ кВт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;  $C_h = 1,057 \text{ кДж}/(\text{кг}_g \cdot \text{К})$  и  $\text{Pr} = 0,7$ .

Коэффициенты конвективной теплопередачи выводятся из данных для уплотненных слоев (см. табл. 4.2) с использованием эквивалентного диаметра частиц  $D_p = 1,82 \text{ см}$ .

$$\text{Re} = D_p v_g / \eta = 1,092 \cdot 10^3;$$

$$\text{Nu} = 1,064 \text{ Re}^{0,59} \text{ Pr}^{1/3} = 58,6;$$

$$h_g = \text{Nu } k / D_p = 0,0966 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Скорость сушки рассчитывается с использованием модели характеристической кривой (уравнение 4.13) и выражается как:

$$n_w = f n_w^o = f \frac{h_g (T_g - T_{wb})}{\Delta H_v},$$

где для этого случая значение  $f$  получается из

$$f = 0,97, \quad X \geq 5,5 \quad \text{и} \quad f = 0,97 \left[ \frac{(X - 0,03)}{5,47} \right]^{1,1}, \quad X < 5,5.$$

Температура воздуха и содержание влаги выводятся из уравнений (4.46) и (4.47). Первый приблизительный расчет температуры во всей сушилке может быть получен [18] из

$$T_p = f T_{wb} + (1 - f) T_{db}.$$

Мы предполагаем, что скорость воздуха достаточно велика, чтобы пренебречь изменениями  $n_w$  в направлении  $y$ . С другой стороны, несмотря на то что значение  $a$ , увеличивается, а  $b$  — уменьшается вместе с влагосодержанием, мы полагаем  $a_b$  продукта на протяжении сушки постоянным.

Таким образом, интенсивность испарения задается уравнением

$$N_w = n_w a_v b = 17,25 n_w.$$

И, наконец, длина сушилки может быть определена из уравнения (4.47). Расчеты выполнены с разбивкой на 12 этапов со средним значением  $N_w$  для каждого из этапов и приводятся в табл. 4.4.

Произведя необходимые расчеты, получим  $L = 14,33$  м.

Туннельные и конвейерные сушилки могут работать как в прямоточном, так и в противоточном режимах, причем выбор того или иного варианта зависит в основном от чувствительности конкретного продукта к температурному воздействию. Противоточные системы, где применяются более низкие температуры и расходы, проявили себя более энергосберегающими, чем прямоточные. Вместе с тем при прямоточной сушке продукт подвергается воздействию более низких температур, что снижает вероятность его повреждения. На практике поток воздуха представляет собой комбинацию «касательной» и «сквозной» циркуляции, что существенно увеличивает интенсивность испарения. Типичные скорости при прохождении воздуха сквозь слой продукта лежат в диапазоне от 0,5 до 1,5 м/с, а рециркуляция воздуха — в диапазоне от 50 до 80%.

Большинство промышленных конвейерных сушилок состоят из более чем одной ступени. Каждая ступень включает в себя один конвейер, но, как правило, они разделены на несколько секций длиной от 1,5 до 3 м. Транспортные ленты бывают длиной от 3 до 20 м и шириной от 1 до 4 м. При типовом монтаже могут быть предусмотрены участки движения воздуха вверх и вниз, а также участок охлаждения. Для обеспечения равномерности сушки направление потока реверсируется. Как правило, на последнем участке поток воздуха направлен вниз, что позволяет избежать выдувания небольших сухих частиц. В каждой из секций для поддержания оптималь-

Таблица 4.4. Двенадцатиэтапный расчет задачи из примера 6

Этап	$X$ (кг <sub>в</sub> /кг <sub>с</sub> )	$Y$ (кг <sub>в</sub> /кг <sub>с</sub> )	$f$ (—)	$T_P$ (°C)	$T_G$ (°C)	$N_w$ (кг/м <sup>2</sup> ч)	$z$ (м)
0	6,35	0,0387	0,970	35,0	47,1	22,14	0
1	5,85	0,0377	0,970	38,9	49,5	27,86	1,00
2	5,35	0,0367	0,941	40,0	51,8	32,33	0,831
3	4,85	0,0357	0,844	43,6	54,1	33,77	0,756
4	4,35	0,0347	0,748	47,2	56,4	34,16	0,736
5	3,85	0,0337	0,654	50,7	58,8	33,53	0,739
6	3,35	0,0327	0,560	54,2	61,1	32,03	0,763
7	2,85	0,0317	0,468	57,6	64,4	29,41	0,814
8	2,35	0,0307	0,378	60,9	65,7	25,86	0,905
9	1,85	0,0297	0,289	64,2	68,0	21,43	1,057
10	1,35	0,0287	0,203	67,4	70,4	16,25	1,326
11	0,85	0,0277	0,120	70,5	72,7	10,30	1,883
12	0,35	0,0267	0,043	73,4	75,0	3,90	3,520

ных условий можно управлять температурой, влажностью и скоростью. Многоступенчатые системы, в состав которых входят два или более размещенных последовательно конвейеров с разными скоростями, осуществляют смешивание и перемещение в более глубокий слой (для повышения равномерности сушки и увеличения времени нахождения продукта в сушилке). В пищевой промышленности используются также конвейеры для многократного перемещения продукта, что позволяет добиться большей компактности и производительности соответствующих установок.

### 4.4.3 Барабанные сушилки

На рис. 4.11 приведена барабанная каскадная сушилка с параллельным потоком. Продукт перемещается по слегка наклоненному цилиндру и высушивается нагретым потоком прямооточного или противоточного воздуха. Корпус медленно вращается. Он оборудован изнутри набором поднимающих частицы скребков. Частицы затем падают и продуваются воздушным потоком.

Моделирование работы каскадной барабанной сушилки предполагает решение системы уравнений, описывающих массообмен и теплопередачу внутри системы и перемещение частиц в барабане. Эти дифференциальные уравнения в основе своей схожи с теми, которые были рассмотрены выше для неподвижных слоев с касательной циркуляцией (см. уравнения 4.42 и 4.43). Основными проблемами в этом случае являются сложная динамика частиц внутри сушилки, которая представлена моделями, соответствующими времени нахождения продукта в сушилке, а также соответствующее выражение коэффициента теплопередачи. Продолжительность сушки и коэффициент конвективной теплопередачи зависят от характеристик продукта и воздуха, размеров сушилки, количества и конструкции скребков, а также скорости вращения барабана. Для прогнозирования времени нахождения продукта в барабанных сушилках было предложено несколько выражений, но ни одно из них не может быть использовано в качестве универсального. Для расчета времени нахождения

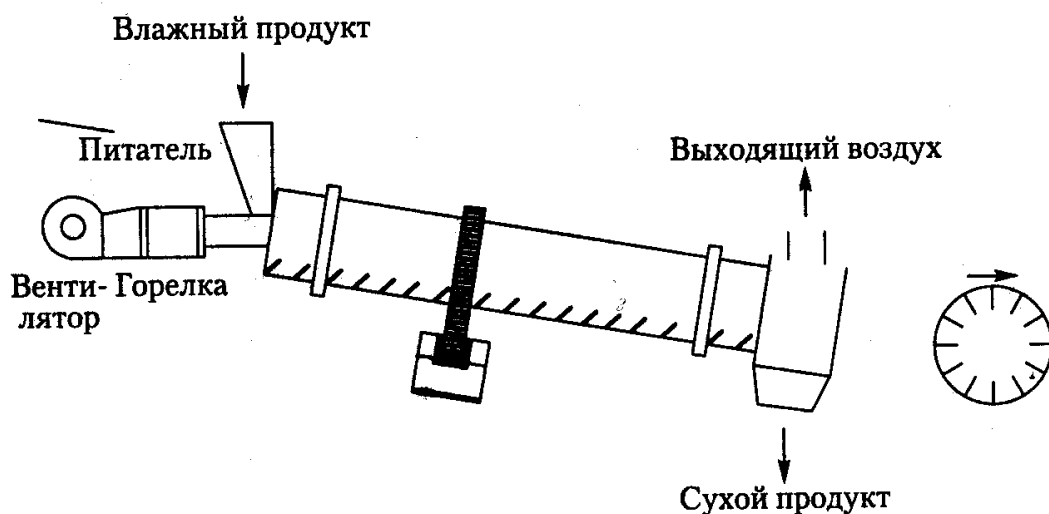


Рис. 4.11. Барабанная сушилка с параллельным потоком воздуха

продукта в барабанной сушилке в минутах рекомендуется использовать следующее уравнение:

$$\tau = \frac{0,23L}{DN^{0,9} \operatorname{tg} \alpha} \pm \frac{10D_p^{-0,5} LG}{F}, \quad (4.50)$$

где знак «+» означает противоток, а знак «-» — прямоток.

В данном уравнении  $L$  и  $D$  выражают длину и диаметр сушилки;  $\alpha$  — уклон стенки барабана;  $N$  — скорость вращения барабанной сушилки, об/мин;  $G$  и  $F$  — расход массы газа и продукта соответственно.

С другой стороны, при рассмотрении сушки как объемной задачи теплопередачи для конструкторских целей предлагается использовать следующее выражение:

$$Q_t = 2,8DLG_a^{0,67} \Delta T_m, \quad (4.51)$$

где  $Q_t$  — общее количество переданного тепла;  $G_a$  — расход массы газа на единицу площади поперечного сечения;  $\Delta T_m$  — средняя разница температур между воздухом и продуктом, которая равна

$$\Delta T_m = \frac{(T_G - T_P)_i - (T_G - T_P)_o}{\ln \left[ \frac{(T_G - T_P)_i}{(T_G - T_P)_o} \right]}. \quad (4.52)$$

Несмотря на то что приведенные выше уравнения вполне применимы на практике, их достоверность для использования в фундаментальных исследованиях принципов конструирования по-прежнему ограничена.

#### 4.4.3.1 Пример 7

Каскадную барабанную прямоточную сушилку необходимо использовать для сушки семян (3000 кг/ч) с первоначальным содержанием влаги 22%. Диаметр сушилки составляет 1,25 м, а длина 10 м. Уклон барабана равен 1°, а скорость вращения составляет 3 об/мин. Предполагается использование 4250 м³/ч окружающего воздуха с температурой 20 °С и относительной влажностью 30%. Воздух за счет непосредственного сгорания природного газа нагревается до температуры в 180 °С. Необходимо рассчитать условия на выходе. Характеристики семян: средний диаметр частицы —  $D_p = 3$  мм, плотность  $\rho_p = 1100$  кг/м³, равновесное влагосодержание  $X_2 = 0,025$  кг<sub>в</sub>/кг<sub>с</sub>, а эффективный коэффициент диффузии  $D_{eff} = 5 \cdot 10^{-11}$  м²/с.

Первоначальное содержание влаги и расход сухого продукта равны:

$$F = 3000 \cdot (1 - 0,22) = 2340 \text{ кг}_s/\text{ч};$$

$$X_i = 0,22/(1 - 0,22) = 0,282 \text{ кг}_v/\text{кг}_s.$$

Параметры свежего воздуха:  $Y = 0,0043 \text{ кг}_v/\text{кг}_g$ ;  $\rho = 1,201 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $C_h = 1,015 \text{ кДж}/(\text{кг}_g \cdot \text{К})$ , а расход сухого воздуха может быть представлен в виде

$$G = 4250 \cdot 1,201 / (1 + 0,0043) = 5082 \text{ кг}/\text{ч}.$$

Баланс массы и энергии при сгорании дает следующий результат:

$$M = 5082 \cdot 1,015 \cdot 160 / (49\,908 - 2,96 \cdot 155) = 16,7 \text{ кг}_{\text{метана}}/\text{ч};$$

$$G_i = 5082 - 1,25 \cdot 16,7 = 5061 \text{ кг}_g/\text{ч};$$

$$Y_i = 0,0043 + 2,25 \cdot 16,7 / 5082 = 0,0117 \text{ кг}_v/\text{кг}_g.$$

Параметры поступающего воздуха в результате получаются следующими:  $T_{wb} = 46,1^\circ\text{С}$ ;  $\rho = 0,774 \text{ кг}/\text{м}^3$  и  $C_h = 1,029 \text{ кДж}/(\text{кг}_g \cdot \text{К})$ . Исходя из размеров сушилки, площадь поперечного сечения и объем составляют:  $A = 1,227 \text{ м}^2$  и  $V = 12,27 \text{ м}^3$ . Время нахождения продукта в сушилке рассчитывается из уравнения (4.50):

$$t = 0,23 \cdot 10 / (0,0157 \cdot 3^{0,9} \cdot 1,25) - 0,01 \cdot 10 \cdot 5061 / [2340 \cdot (2 \cdot 10^{-3})^{0,5}] = \\ = 43,60 - 3,95 = 39,65 \text{ мин} = 2379 \text{ с}.$$

На основании полученного результата объемная загрузка и время нахождения продукта в сушилке равны

$$V_p = 3000 \cdot t / \rho_p = 1,811n;$$

$$H = V_p / V = 0,148.$$

Из-за перемешивания и высоких скоростей воздуха в большинстве случаев сушки продуктов в барабанных сушилках внешнее сопротивление массообмену пренебрежимо мало. Если предположить отсутствие сжатия и постоянство эффективного коэффициента, то сушка сферических частиц [10] определяется уравнением

$$\frac{X - X_e}{X_i - X_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum \frac{1}{n^2} \exp \left[ -\frac{n^2 D_{eff}}{R_p^2} t \right].$$

Предполагая, что все частицы высушиваются в одинаковой степени, и беря первый член ряда (допущение, действительное для достаточно продолжительных промежутков времени), конечное содержание влаги равно

$$X_o = 0,025 + (0,282 - 0,025) 6 / \pi^2 \exp [-5 \cdot 10^{-11} \cdot 2379 / 2,25 \cdot 10^{-6}] = 0,173 \text{ кг}_w/\text{кг}_s.$$

На основании общего баланса массы и энергии температура и влажность на выходе составляют

$$Y_o = 0,0117 + 2340 \cdot (0,282 - 0,173)/5061 = 0,0621 \text{ кг}_v/\text{кг}_g;$$

$$T_o = 180 - 2340 \cdot (0,282 - 0,173) \cdot 2443/(5061 \cdot 1,029) = 60,3^\circ\text{C},$$

где тепловая нагрузка составляет:

$$Q = 2340 \cdot (0,282 - 0,173) \cdot 2443 = 6,23 \cdot 10^5 \text{ кДж/ч}.$$

Обратите внимание, что общее количество тепла, которое может быть передано от воздуха к продукту за счет конвекции, выражается следующим образом:

$$Q_c = h_g a_v V(\Delta T)_m.$$

Характеристики воздуха для усредненных условий ( $T_{ave} = 120^\circ\text{C}$  и  $Y_{ave} = 0,0369 \text{ кг}_v/\text{кг}_g$ ):  $\rho = 0,879 \text{ кг/м}^3$ ;  $\eta = 2,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $k = 3,4 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$  и  $Pr = 0,7$ ; таким образом, скорость потока воздуха равна

$$v = G(1 + X)/[\rho(1 - H)A] = 5061 \cdot 1,0369/(0,879 \cdot 0,852 \cdot 1,227 \cdot 3600) = 1,59 \text{ м/с}.$$

Коэффициент  $(1 - H)$  присутствует для учета воздействия скребков и продукта на участке поперечного сечения. Усредненный коэффициент теплопередачи равен (см. табл. 4.2):

$$Re = D_p v_g / \eta = 183;$$

$$Nu = 0,33 Re^{0,6} = 7,52;$$

$$h_g = Nu k / D_p = 0,0852 \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Предполагая, что продукт имеет температуру влажного термометра, получаем:

$$\Delta T_m = (133,9 - 14,2)/\ln(133,9/14,2) = 53,3^\circ\text{C}.$$

Общее количество тепла, получаемое сжиганием газа, гораздо больше, чем необходимо для испарения воды; это свидетельствует о том, что теплопередача не является основным фактором сопротивления. И, наконец, применение уравнения (4.51) к данному примеру дает  $Q_c = 5,63 \cdot 10^5 \text{ кДж/ч}$ , что примерно на 10% ниже, чем тепловая нагрузка, полученная выше.

Барабанные сушилки наиболее пригодны для сушки продуктов, имеющих тенденцию к склеиванию. Перемешивание и большая поверхность, подвергающаяся воздействию, обеспечивают относительно высокую интенсивность испарения и равномерную сушку. Тем не менее применение этих сушилок ограничено из-за возможности повреждения пищевых продуктов, вызываемого столкновениями и трением о барабан. Типовые габариты сушилки — от 0,5 до 3 м в диаметре и в длину — до 5–10-кратного диаметра. Корпус располагается с уклоном от 0 до  $5^\circ$ . Окружная скорость вращения составляет, как правило, от 0,25 до 0,4 м/с. Размер частиц может составлять от 100–200 мкм до нескольких сантиметров. Обычно задержка продукта в сушилке составляет 10–15%. В сушилках используется расход воздушного потока от 1 до 3 кг/(м<sup>2</sup> · с), что дает скорость газа от 0,5 до 2,5 м/с.



#### 4.4.4 Распылительные или пневматические сушилки

В распылительных или пневматических сушилках пищевые продукты непрерывно высушиваются в вертикальной трубе, перемещаясь при этом нагретым потоком воздуха, который, как правило, состоит из воздуха и образованных продуктами сгорания газов. После очень кратких периодов сушки (порядка несколько секунд) для отделения высушенного продукта от отработанного воздуха используются один или несколько циклонов. Типичная конфигурация пневматической сушилки схематически приведена на рис. 4.12. Небольшая продолжительность контакта, малые размеры частиц (менее 2 мм), а также режим параллельного потока позволяют использовать относительно высокие температуры воздуха, при этом не подвергая высушиваемый продукт перегреву.

Уравнения теплопередачи и массообмена, моделирующие процесс, схожи с предложенными для слоев с касательной циркуляцией в параллельном потоке (уравнения 4.42 и 4.43). Для подъема и сортировки частиц, как правило, необходимо регулировать скорость воздушного потока. При псевдоожижении и пневматическом перемещении высушиваемых частиц важны две предельные скорости: начальная скорость витания  $v_f$  представляет собой минимальную скорость воздуха, необходимую для достижения псевдоожижения. Скорость уноса  $v_e$  — это скорость, необходимая для транспортировки частиц в воздушном потоке. Для сферических частиц диаметром  $D_p$  эти скорости могут быть рассчитаны следующим образом:

$$v_f = \frac{gD_p^2 \epsilon^3 (\rho_w - \rho)}{180\mu(1 - \epsilon)}; \quad (4.53)$$

$$v_e = \frac{gD_p^2 (\rho_s - \rho)}{18\mu}, \quad (4.54)$$

где  $\rho_s$  и  $\rho$  — соответственно плотности данного вещества и воздуха;  $g$  — ускорение свободного падения;  $\mu$  — плотность псевдоожиженного слоя;  $\epsilon$  — пористость слоя.

Для использования этих выражений при выборе скорости воздуха частицы должны иметь примерно одинаковую форму и гранулометрический состав.

Если подаваемый материал будет иметь более широкий гранулометрический состав  $E(D_p)$ , то маленькие и менее влажные частицы будут высушиваться и передаваться быстрее, чем более тяжелые, которые будут находиться в псевдоожиженном слое до тех пор, пока не высохнут. Таким образом, существует некоторое распределение периодов нахождения материала в сушилке, и среднее содержание влаги в выходящем из сушилки материале может быть выражено как

$$X_m = \int_0^{\infty} E(D_p) X(D_p) dD_p, \quad (4.55)$$

где  $X(D_p)$  — содержание влаги в частице после сушки в течение времени нахождения в сушилке.

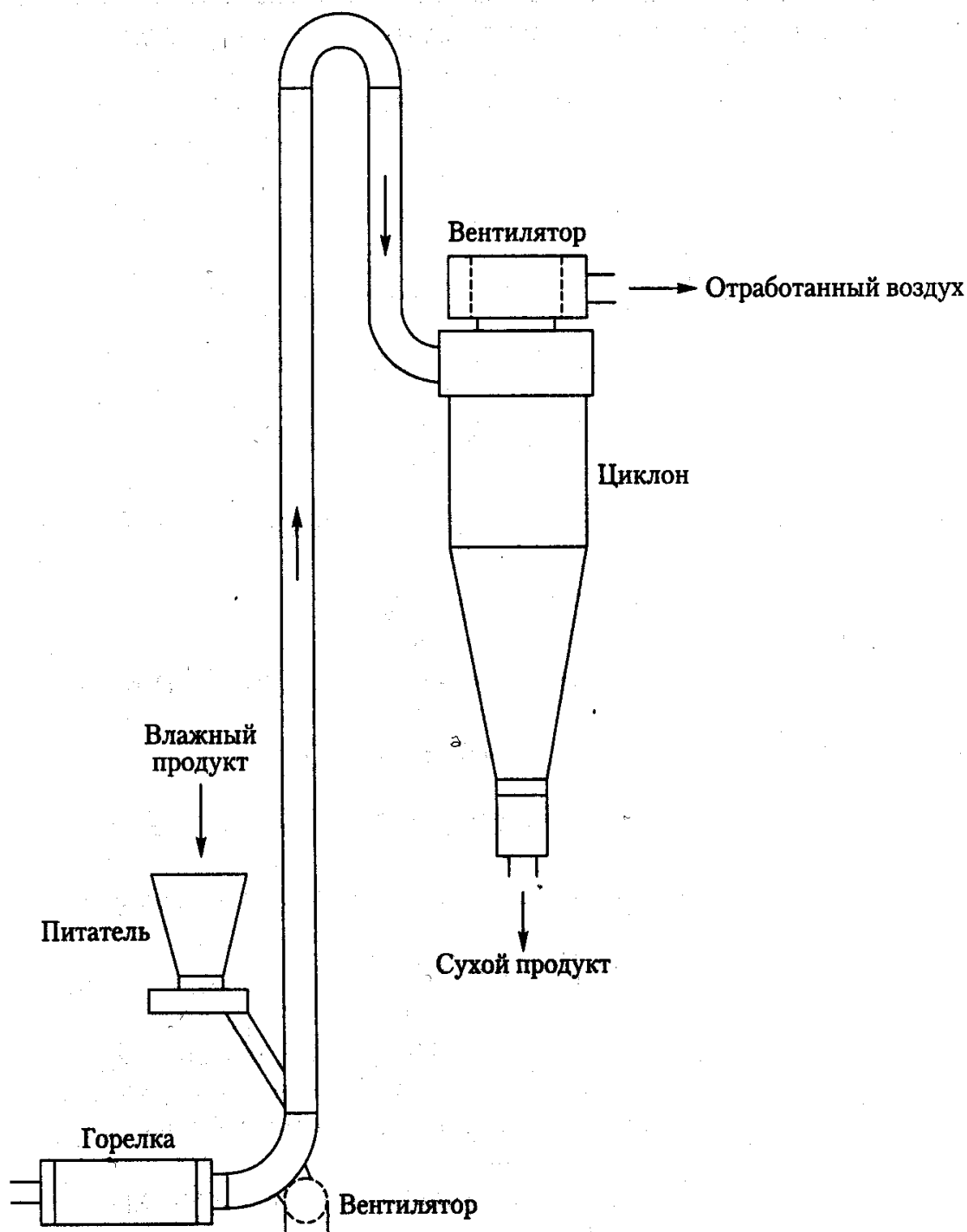


Рис. 4.12. Схема пневматической сушилки

#### 4.4.4.1 Пример 8

Необходимо сконструировать распылительную сушилку для высушивания 7500 кг гранулированного пюре из картофеля и соответствующего снижения его влагосодержания с 28 до 13%. Окружающий воздух ( $F = 20^\circ\text{C}$  и  $Y = 0,0043 \text{ кг}_\text{в}/\text{кг}_\text{с}$ ) нагревается за счет непосредственного сгорания природного газа. Начальная температура —  $60^\circ\text{C}$ , а рекомендуемая температура поступающего в сушилку и выходящего из нее воздуха составляет соответственно  $220$  и  $75^\circ\text{C}$ . Следует рассчитать необходимое количество воздуха и габариты сушильного агрегата.

Основные характеристики картофельных гранул: средний диаметр частиц  $D_p = 0,3$  мм, плотность  $\rho_p = 1250$  кг/м<sup>3</sup>, удельная теплоемкость  $C_p = 1,85$  кДж/(кг · К), коэффициент теплопроводности  $k_d = 0,21 \cdot 10^{-3}$  Вт/(м · К) и эффективный коэффициент диффузии  $D_d = 2,5 \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup>/с. Из изотерм сорбции можно рассчитать, что на выходе  $X_e = 0,045$  кг<sub>w</sub>/кг<sub>g</sub> и  $(dX/dP)_T = 1,3 \cdot 10^{-2}$ .

Скорость потока продукта, начальное и конечное влагосодержание равны

$$F = 7500 \cdot (1 - 0,28) = 5400 \text{ кг}_s/\text{ч};$$

$$X_i = 0,28/(1 - 0,28) = 0,389 \text{ кг}_w/\text{кг}_s;$$

$$X_o = 0,13/(1 - 0,13) = 0,149 \text{ кг}_w/\text{кг}_s.$$

Балансы массы и энергии (уравнения 4.28–4.31) равны:

$$Y_i = 0,0136 \text{ кг}_w/\text{кг}_g.$$

Характеристики сушильного воздуха:  $T_{wb} = 50,2$  °С;  $\rho = 0,710$  кг/м<sup>3</sup>;  $\eta = 3,8 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с и  $C_h = 1,032$  кДж/(кг<sub>g</sub> · К).

Скорость уноса рассчитывается по уравнению (4.54):

$$v_t = 9,81 \cdot 0,3^2 \cdot 10^{-6} \cdot (1250/0,71 - 1)/(18 \cdot 3,8 \cdot 10^{-5}) = 2,27 \text{ м/с}.$$

Таким образом, минимальный расход воздуха для транспортировки частиц равен

$$G_{\min} = \rho v_t A/(1 + Y).$$

Исходя из типовых размеров сушилки (от 0,5 до 1,2 м), значение  $G_{\min}$  получается в диапазоне от 1100 до 6500 кг/ч. Несмотря на то что значение  $v_t$  растет при снижении температуры, данные расчеты дают значение с некоторым запасом из-за снижения  $D_p$  вследствие усадки в процессе сушки.

С другой стороны, при использовании условий массообмена (уравнение 4.32), минимальный расход воздуха равен

$$G_{\min} = 5400 \cdot (0,389 - 0,149)/(0,203 - 0,0136) = 6840 \text{ кг}_g/\text{ч}.$$

В конечном итоге, принимая во внимание тепловую нагрузку, значение  $G_{\min}$  может быть выведено из уравнения (4.33):

$$G_{\min} = 2425 \cdot 5400 \cdot (0,389 - 0,149)/220 - 75 = 21\,675 \text{ кг}_g/\text{ч}.$$

Если предположить, что часть воздуха должна быть рециркулирована и его достаточно для пневматической транспортировки гранул, то минимальный расход воздуха определяется термической потребностью.

Сушка этого продукта может быть смоделирована с помощью модели «отступающего фронта», а также уравнений (4.15) и (4.16), где общие коэффициенты теплопередачи и массообмена для сферических тел выражаются следующим образом:

$$U = \frac{h_g}{1 + \frac{h_g \Delta R}{k_d (1 - \Delta R / R_p)}};$$

$$K_g = \frac{k_g}{1 + \frac{k_g \Delta R}{\rho_s (\partial X / \partial P) D_d (1 - \Delta R / R_p)}}.$$

Коэффициенты конвективной теплопередачи выводятся по корреляции для сферы (см. табл. 4.2) с использованием конечной скорости:

$$Re = D_p v_t / \eta;$$

$$Nu = 2,0 + 0,6 Re^{1/2} Pr^{1/3};$$

$$h_g = Nu k / D_p;$$

$$k_g = 150 / h_g.$$

Таблица 4.5. Решение для примера 8

Этап	W, %	Y, кг <sub>в</sub> /кг <sub>г</sub>	T <sub>p</sub> , °C	T <sub>g</sub> , °C	v <sub>g</sub> , м/с	ΔP, кПа	ΔX/Δt, кг/кгс	Δt, с
0	28	0,0136	60,0	220,0	19,7	16,75	1,415	0
1	27	0,0183	54,2	211,5	19,4	11,52	0,703	0,0191
2	26	0,0228	57,6	199,2	19,2	13,52	0,639	0,0278
3	25	0,0272	60,0	187,7	18,8	15,02	0,574	0,0294
4	24	0,0315	62,3	176,5	18,5	16,16	0,514	0,0328
5	23	0,0357	63,9	165,9	18,3	17,07	0,461	0,0334
6	22	0,0398	64,9	155,7	18,0	17,62	0,410	0,0380
7	21	0,0438	65,7	146,0	17,7	17,64	0,358	0,0418
8	20	0,0477	66,3	136,5	17,4	17,69	0,315	0,0468
9	19	0,0515	66,3	127,5	17,1	17,54	0,276	0,0520
10	18	0,0552	66,2	118,9	16,8	16,76	0,235	0,0588
11	17	0,0588	65,8	110,5	16,6	15,75	0,196	0,0676
12	16	0,0624	65,2	102,4	16,3	14,74	0,164	0,0786
13	15	0,0657	64,3	94,7	16,0	13,38	0,133	0,0938
14	14	0,0691	63,2	87,2	15,7	11,79	0,105	0,1146
15	13	0,0724	62,8	80,1	15,5	10,02	0,080	0,1444

Температура воздуха и содержание влаги выводятся из уравнений (4.46) и (4.47). Решение задачи с разбивкой на 15 этапов и с учетом усредненных коэффициентов и движущих сил для каждого из этапов представлено в табл. 4.5 (расход газа — 22 000 кг/ч, размер частиц — постоянный). Обратите внимание, что наиболее интенсивная сушка осуществляется на первых метрах сушилки. Производительность сушилки зависит от диаметра и высоты камеры. Высота сушилки рассчитывается следующим образом:

$$L = (v_g - v_t)t.$$

Для диаметра 0,75 м и соответствующих ему скоростей (см. табл. 4.5) высота равна  $L = 13,4$  м.

При пневматической транспортировке теплопередача и массообмен осуществляются в основном за счет конвекции. Высокотемпературный и кратковременный технологический процесс обеспечивает очень высокую интенсивность испарения, особенно на входе, где испарение несвязанной влаги осуществляется практически мгновенно. Для предотвращения перегрева небольших частиц и недостаточного высушивания крупных необходим ограниченный гранулометрический состав с максимальным размером частиц от 1 до 2 мм. Скорость газа зависит от размера частиц, но, как правило, она составляет от 10 до 30 м/с. Типовые размеры сушилок варьируются от 0,6 до 1,1 м в диаметре и от 12 до 30 м в длину. Пневматические сушилки часто сочетаются со второй сушилкой, необходимой для достижения конечного содержания влаги.

## 4.5 Выбор сушилки

Оборудование для сушки пищевых продуктов должно выбираться и конструироваться на основе:

- учета свойств сырья;
- требований к качеству сухого продукта;
- экономического анализа и оценки затрат;
- требований к технике безопасности и охране окружающей среды.

Способы применения и некоторые характеристики широко используемых типов сушилок для пищевых продуктов сведены соответственно в табл. 4.1 и 4.6. Информация, касающаяся выбора и оценки производительности промышленных сушильных агрегатов, дана в [19, 27, 42]; обзор возможных вариантов сушки пищевых продуктов — в [12, 16, 26, 35, 39].

Сушилки периодического действия, лотковые сушилки и сушильные шкафы могут быть использованы для сушки различных пищевых продуктов, однако их использование и производительность ограничены большой продолжительностью циклов сушки и ее неравномерностью на разных участках сушильной камеры. К основным преимуществам таких сушилок можно отнести относительно низкие ка-

Таблица 4.6. Характеристики некоторых сушильных агрегатов

Тип сушилки	Испарительная способность, $\text{кг}_\text{в}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	Потребление энергии, $\text{кДж}/\text{кг}_\text{в}$	Термический КПД, %	Продолжительность пребывания продукта в сушилке, с, мин, ч
Лотковые сушилки или сушильные шкафы	0,1–1	3000–4500	50–80	2–24 ч
Тоннельные и конвейерные сушилки	5–18	4000–6000	35–60	10–180 мин
Вальцовые сушилки	30–120	3500–6000	40–70	10–60 мин
Сушилки с псевдоожиженным слоем	30–90	3100–6000	40–80	5–30 мин
Пневматические сушилки	10–100	3500–5000	50–75	2–15 с
Распылительные сушилки	1–30	4000–5000	50–60	5–120 с
Барабанные сушилки	4–30	3000–3500	70–85	10–30 с
Вакуумные и сублимационные сушилки	1–7	>7500	–	1–24 ч

питательные затраты, включая техническое обслуживание, а также возможность непосредственного изменения объемов сушки, что важно для различных испытаний в небольшом масштабе. Промышленное применение сушильных шкафов ограничено относительно небольшой их производительностью. Сушка сыпучих твердых веществ, не допускающих склеивания, с высокой производительностью требует зачастую применения туннельных или конвейерных сушилок. Конвейерные сушилки обеспечивают лучший контроль условий сушки, а также более равномерное качество. Ленточный конвейер и вибрирующий слой обеспечивают более равномерную сушку, а также более эффективное энергопотребление, но увеличивают размеры капиталовложений.

Барабанные сушилки применяются в процессе сушки продуктов, имеющих тенденцию к склеиванию. Такие агрегаты обеспечивают очень высокую интенсивность сушки, а также равномерное высушивание продукта. Как уже отмечалось выше, следует принимать во внимание возможность повреждения пищевых продуктов из-за столкновений и трения.

Распылительные или пневматические сушилки используются в основном для сушки порошковых и гранулированных материалов. Для обеспечения необходимой конечной влажности распылительные сушилки используются зачастую с дополнительным сушильным агрегатом. Применение сушилок с псевдоожиженным слоем ограничено работой с теми пищевыми продуктами, частицы которых, как правило, по размерам превышают 0,1 мм, равномерно образуют кипящий слой без

механических повреждений. Пневматические сушилки и сушилки с псевдоожиженным слоем отличаются высокой интенсивностью сушки и термической эффективностью, а также возможностью регулирования условий сушки. Кроме этого, благодаря простоте конструкции и небольшому количеству подвижных компонентов, капитальные затраты и затраты на проведение технического обслуживания относительно невысоки. Распылительные сушилки используются для дегидратации жидких и полужидких пищевых продуктов — например, растворов, суспензий и паст. Такие сушилки обладают высокой производительностью, но требуют больших капитальных и энергетических затрат. Барабанные сушилки хорошо подходят для сушки жидкостей, каш и паст с высокой интенсивностью и эффективным использованием энергии, но их применение также требует относительно высоких капитальных затрат и расходов на техническое обслуживание. Применение подобных сушилок ограничено из-за возможности повреждения продуктов, чувствительных к воздействию повышенных температур.

Высушенные в стандартной воздушной, а также в барабанных сушилках, пищевые продукты, как правило, бывают подвержены чрезмерным повреждениям, замедленной регидратации или восстановлению. Применение сушилок с псевдоожиженным слоем и распылительных сушилок приводит к меньшим тепловым повреждениям, а регидратация высушенных в таком оборудовании продуктов отличается более высоким качеством. Сушка во вспененном состоянии и сушка при сбрасывании давления увеличивают стоимость по сравнению с традиционными методами, но одновременно улучшают качество продуктов, обеспечивая их быструю регидратацию. Применение вспенивания ограничено небольшими производствами — его используют только при работе с жидкими продуктами, способными к формированию стабильной пены. Применение сушки при сбрасывании давления до сих пор ограничивается лишь некоторыми фруктами и овощами. Вакуумная и сублимационная сушка представляют собой очень дорогостоящие методы дегидратации, но поскольку процесс сушки проходит при более низких температурах, то термические повреждения продукта сводятся к минимуму, а качество продукта при использовании названных методов очень высоко. Применение вакуумной и сублимационной сушки ограничивается пищевыми продуктами, очень чувствительными к воздействию тепла, а также очень дорогими.

### 4.5.1 Оценка затрат

Сушка представляет собой отдельный технологический процесс, но экономический анализ все чаще приходится проводить, исходя из более широкого контекста всего производственного процесса. Полезные рекомендации, касающиеся оценки затрат и анализа рентабельности приведены в главе 13, а общие основы оценки затрат — в работе [28], где проанализированы движение денежных средств, факторы, воздействующие на производственные и инвестиционные затраты, оценка капитальных затрат, показатели для корректировки смет и т. п.

В качестве первой приблизительной оценки можно сказать, что стоимость смонтированных промышленных сушилок колеблется от \$1000 до \$25 000/м<sup>2</sup>. Столь

значительные расхождения объясняются различными размерами и типами сушильных агрегатов. Наиболее дешевы туннельные и лотковые сушилки. Стоимость конвейерных сушилок составляет от \$1500 и \$3000/м<sup>2</sup>. В случае монтажа конвейерных и вибросистем затраты возрастают. Пневмогазовые вальцовые сушилки стоят от \$2500 до \$3300/м<sup>2</sup> для участков площадью от 120 до 10 м<sup>2</sup>. Стоимость вальцовых паровых сушилок колеблется от \$1500 до \$9500/м<sup>2</sup> с передаточными зонами от 1000 до 30 м<sup>2</sup>. Цены за единицу оборудования для вальцовых сушилок выше. Стоимость воздушных сушилок с двойным барабаном составляет от \$2600 до \$15 000/м<sup>2</sup> (площадь — от 50 до 5 м<sup>2</sup>). Расходы на монтаж вакуумной сушилки с одним барабаном могут составить от \$20 000 до \$25 000/м<sup>2</sup> для участков площадью от 15 до 1 м<sup>2</sup>. Примерная стоимость типовых сушилок приводится в работах [27–29 и 42].

Приведенные выше цифры предполагают, что затраты на 1 м<sup>2</sup> уменьшаются с ростом производства. Эта зависимость отражена в коэффициенте «шести десятых»

$$\frac{C_1}{C_2} = \left( \frac{A_1}{A_2} \right)^{r_c}, \quad (4.56)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  — затраты на приобретение сушилки, соответствующие производственным площадям  $A_1$  и  $A_2$  соответственно;  $r_c$  — экстраполирующий коэффициент.

Эмпирическое правило  $r_c = 0,6$  может быть заменено более подходящими значениями, взятыми из публикаций, основывающихся на данных производства. Например, в работе [29] даны значения  $r_c$  для барабанных, лотковых и поворотных вакуумных сушилок, составляющие 0,45, 0,38 и 0,45 соответственно. В работе [28] рекомендуется для воздушных сушилок с одним барабаном применять значения  $r_c = 0,40$  и  $r_c = 0,76$  — для вакуумных сушилок с одним барабаном. В работе [42] для барабанных сушилок прямого нагрева рекомендуется  $r_c = 0,424$ , а для термических и распылительных сушилок — линейная зависимость между стоимостью и производительностью, которая предполагает значения  $r_c$ , равные 0,35 и 0,47 соответственно. В общих чертах эти экстраполяции достаточно надежны для увеличения производительности до десятикратной.

Уравнение (4.56) можно записать с использованием удельных затрат  $S = C/A$ , и тогда

$$\frac{S_1}{S_2} = \left( \frac{A_2}{A_1} \right)^{1-r_c}. \quad (4.57)$$

В первом приближении оценка затрат используется с учетом всех технических соображений, обуславливающих выбор одной или нескольких сушилок. Следующим шагом для получения более точной оценки затрат является работа с предлагающими свой товар фирмами. Большое разнообразие оборудования для сушки и сложности в увеличении его производительности привели к появлению поставщиков, специализирующихся на данном оборудовании. При работе с поставщиками



заказчик зачастую оценивает как затраты на оборудование, так и его ожидаемую производительность. В идеальном случае поставщик должен гарантировать и то, и другое. Во многих случаях возникает необходимость в проведении испытаний оборудования. Иногда поставщики имеют демонстрационное оборудование с проверенными методами повышения его производительности. При работе с разнообразными пищевыми продуктами необходимо отдавать себе отчет в том, что очень важными в работе испытываемого оборудования могут являться вспомогательные системы — например, пылесборники, питатели и т. п. Важной составляющей при проведении испытаний является обеспечение всего разнообразия испытываемого материала [24].

После примерной оценки затрат необходимо приступить к рассмотрению всей системы сушки в целом — с учетом всех необходимых вспомогательных систем (например, трубопроводов, конвейеров, вентиляторов, двигателей, нагревателей, циклонов и пылесборников). Для расчета окончательных затрат необходимо учитывать и капитальные затраты (включая проектирование, здания и сооружения, фундаменты, КИПиА и дополнительные службы). В работе [42] предлагается умножать стоимость оборудования на коэффициент 2,25–2,75, что позволяет рассчитать окончательные затраты на установку оборудования. Это средняя цифра относится к различным сушилкам (конвейерным, распылительным, барабанным, а также к сушилкам с псевдоожиженным слоем), изготовленным из нержавеющей или углеродистой стали.

В процессе принятия решений необходимо принимать во внимание и оценивать затраты на эксплуатацию. Дегидратация пищевых продуктов — один из наиболее энергоемких процессов, и энергопотребление — ведущий фактор, определяющий общую стоимость производства. Затраты на электроэнергию определяются начальным и конечным содержанием влаги, условиями сушки, объемом производства и типом сушильного агрегата (сушка с принудительно подаваемым воздухом, сушка в барабанных сушилках или вакуумная сушка). Потребление электроэнергии различными сушильными агрегатами рассмотрено в работах [13, 37], а в работе [36] проанализированы основные проблемы энергопотребления в процессе сушки и рассмотрены возможные пути оптимизации этих затрат. Типичное энергопотребление и эффективность (энергия, фактически расходуемая на испарение воды — относительно всей имеющейся энергии) различных типов сушильных агрегатов приводятся в табл. 4.6. В работе [9] рассмотрены четыре основные стратегии относительно эксплуатации сушильных агрегатов: 1) повышение производительности или снижение нагрузки на испарение другим способом; 2) оптимизация температур нагрева и влажности воздуха; 3) снижение тепловпотерь и 4) использование иных способов (средств) подачи тепла, причем с примерами практического внедрения тех или иных вариантов.

Эксплуатация туннельных сушилок и сушильных шкафов связана с относительно высокой стоимостью рабочей силы. Технологический процесс упрощается благодаря автоматической загрузке и транспортировке, что снижает и затраты на оплату труда. Кроме того, необходимо заметить, что затраты на техническое обслуживание составляют около 5–6% от общих затрат на его монтаж, причем эта цифра может составлять 3% для простых сушилок (лотковые, распылительные и туннельные су-

сушилки) и 10% — для сложных с механической точки зрения систем (поворотные барабанные и вакуумные сушилки).

Использование сушильных шкафов и туннельных сушилок связано, как правило, с наибольшими затратами. Относительно невысоки затраты на сушку в конвейерных, барабанных или же пневматических системах. Более дорогим является процесс сушки в сушильных агрегатах с псевдоожиженным слоем и распылительных сушилках (стоимость такого процесса может оказаться в два раза выше, чем сушка в конвективных сушилках). Использование вакуума в значительной степени повышает затраты на сушку пищевых продуктов, но самый дорогой из всех возможных процессов дегидратации продуктов — это сублимационная сушка (затраты на нее в 4–5 раз выше, чем на обычную сушку горячим воздухом).

В работе [33] на примере нескольких сушилок рассмотрены затраты на монтаж и эксплуатацию оборудования при различной интенсивности испарения. Исследования показали, что общие затраты на сушилки с принудительно подаваемым воздухом, псевдоожиженным слоем и барабанные сушилки примерно одинаковы, тогда как затраты на вакуумные и сублимационные сушилки гораздо выше. Подобное разделение на группы имеет место и в оценке производственных затрат.

Окончательный выбор сушильного агрегата не должен основываться исключительно на инвестиционных и эксплуатационных затратах. Наибольшее внимание в процессе выбора следует уделять качеству готовой продукции. Как правило, «качество» и «затраты» находятся в обратной зависимости. При любом варианте применения конструктор должен стремиться найти приемлемое сочетание затрат, энергопотребления, производительности, качества и цены готовой продукции.

## 4.5.2 Риски, возникающие в процессе сушки

Основными рисками в процессе сушки является пожаро- и взрывоопасность. Пожары могут возникать в результате воспламенения подвергающегося сушке материала, возгорания выделяющихся из него летучих веществ или происшествий с используемым топливом. Взрывы в процессе сушки чаще всего связаны со взрывами пыли. Взрыв может произойти как в самой сушилке, так и во вспомогательном оборудовании — в первую очередь, в пылесборниках.

Горячая пыль представляет собой взрывоопасный материал, причем в процессе сушки опасность взрыва увеличивается. Большинство компонентов систем сушки, начиная от подачи материала и заканчивая его упаковкой, взаимосвязаны. Именно поэтому оценка риска должна производиться по операции в целом. Вероятными объектами взрыва являются пылесборники и связывающие их трубопроводы. Другой возможной причиной взрыва могут стать искры или статическое электричество. Особое внимание следует обратить на те сушилки, температура стенок которых гораздо выше температуры высушиваемого продукта, поскольку такое состояние может стать источником опасности в случае прерывания цикла (этот вопрос рассмотрен в работах [9, 19, 42]).

Национальный свод противопожарных правил США [25] включает в себя законы, стандарты и директивы, разработанные техническими комитетами Националь-

**Таблица 4.7. Некоторые нормативные акты Свода правил Национальной противопожарной ассоциации США, связанные с процессом сушки**

Содержание нормативного акта	Год	Свод правил
Пожары и взрывы пыли на предприятиях, изготавливающих и обрабатывающих крахмал	1989	61 A, Том 2
Пожары и взрывы пыли при помоле сельскохозяйственных продуктов, предназначенных для потребления человеком	1989	61 D, Том 2
Печи и топочные камеры, их проектирование, размещение и оборудование	1990	86, Том 2
Промышленные топочные камеры, использующие вакуум	1990	86D, Том 4
Монтаж вытяжных устройств для воздушной транспортировки материалов	1992	91, Том 4
Пневматические системы транспортировки для работы с горючими материалами	1990	650, Том 7

ной противопожарной Ассоциации (NFPA). Справочные данные, касающиеся материалов, имеющих отношение к процессу сушки пищевых продуктов, приведены в табл. 4.7.

В «Стандартах для пневматических систем транспортировки при работе с горючими материалами» указывается, что взрыв пыли может иметь четыре основных причины: 1) наличие горючей пыли; 2) содержание пыли в воздухе или кислороде в концентрации, равной или превышающей концентрацию, достаточную для взрыва; 3) наличие источника возгорания и 4) слеживание. Существуют тщательно разработанные стандарты требований, предъявляемых к оборудованию (а также к контролю уровня пыли, снижению взрывоопасности, к вентиляции и другим аспектам), определяющие правила проведения испытаний на взрывоопасность.

## Литература

1. Abbott, J. A. Prevention of Fires and Explosions in Dryers — A User Guide. — 2nd ed. — Rugby, U. K.: Institute of Chemical Engineering. — 1990.
2. Agricultural Engineers Yearbook / American Society of Agricultural Engineers. — St. Joseph, MI: ASAE, 1982.
3. Bakker-Arkema, F. W. Heat and mass transfer aspects and modeling of dryers — a critical review // Concentration and Drying of Foods / MacCarthy, D. (ed.). — London: Elsevier, 1986. — P. 165–202.
4. Bird, R. B., Stewart, W. E., and Lightfoot, E. N. Transport Phenomena. — NY: John Wiley, 1960.
5. Bradshaw, R. D. and Myers, J. E. Heat and mass transfer in fixed and fluidized beds of large particles, // IChE J. — 1963. — № 9. — P. 590–598.

6. Brooker, D. B., Baker-Arkema, F. W., and Hall, C. W. *Drying Cereal Grains*. — Westport, CT: AVI Publishing, 1974.
7. Bruin, S. and Luyben, K. Ch. A. M. *Drying of food materials: a review of recent developments // Advances in Drying*. — Vol. 1 / Mujumdar, A. S. (ed.). — Washington, D. C.: Hemisphere, 1980. — P. 155–215.
8. Charm, S. E. *The Fundamentals of Food Engineering*. — 2nd ed. — Westport, CT: Avi Publishing, 1971.
9. Cook, E. M. and DuMont, J. D. *Process Drying Practice*. — NY: McGraw-Hill, 1991.
10. Crank, J. *The Mathematics of Diffusion*. — London: Oxford University Press, 1967.
11. Crapiste, G. H., Whitaker, S., and Rotstein, E. *Drying of cellular material. I. A mass transfer theory. II. Experimental and numerical results // Chem. Eng. Sci.* — 1988. — № 43(11). — P. 2919–2936.
12. Fellows, P. *Food Processing Technology: Principles and Practice*. — Chichester, U. K.: Fills Horwood, 1988.
13. Flink, J. M. *Energy analysis in dehydration processes // Food Technol.* — 1977. — № 3. — P. 77–84.
14. Fornell, A., Bimbenet, J. J., and Amin, Y. *Experimental study and modelization for air drying of vegetable products // Lebensm.-Wiss. und Technol.* — 1980. — № 14. — S. 96–100.
15. Fortes, M. and Okos, M. R. *Drying theories: their bases and limitations as applied to food and grains // Advances in Drying*. — Vol. 1 / Mujumdar, A. S. (ed.). — Washington, D. C.: Hemisphere, 1980. — P. 119–154.
16. Jayaraman, J. S. and Das Gupta D. K. *Dehydration of fruits and vegetables — recent developments in principles and techniques // Drying Technol.* — 1992. — № 10(1). — P. 1–50.
17. Keey, R. B. *Drying Principles and Practice*. — Oxford: Pergamon Press, 1972.
18. Keey, R. B. *Intruduction to Industrial Drying Operations*. — Oxford: Pergamon Press, 1978.
19. Keey, R. B. *Drying of Loose and Particulate Materials*. — NY: Hemisphere, 1991.
20. Keey, R. B. and Suzuki, M. *On the Characteristic drying curve // Int. J. Heat Mass Transfer*. — 1974. — № 17. — P. 1455–1464.
21. Lee, D. S. and Pyun, Y. R. *Optimization of operating conditions in tunnel drying of food // Drying Technol.* — 1993. — № 11(5). — P. 1025–1052.
22. Masters, K. *Spray Drying Handbook*. — London: George Godwin Ltd, 1979.
23. Mishkin, M., Saguy, I., and Karel, M. *Dynamic optimization of dehydration processes: minimizing browning in dehydration of potatoes // J. Food Sci.* — 1983. — № 48. — P. 1617–1621.
24. Moyers, C. G. *Don't let dryer problems put you through the wringer // Chem. Eng. Process*. — 1992. — № 88(12). — P. 34–40.
25. Mujundar, A. S. *Handbook of Industrial Drying*. — NY: Marcel Dekker, 1987.
26. Okos, M. R., Narsimhan, G., Singh, R. K., and Weitnauer, A. C. *Food dehydration // Handbook of Food Engineering / Heldman, D. R. and Lund, D. B. (eds)*. — NY: Marcel Dekker, Inc., 1992. — P. 437–562.
27. Perry, R. H. and Chilton, C. H. *Chemical Engineers' Handbook*. — 5th ed. — Tokyo: McGraw-Hill Kogakusha, 1973.
28. Peters, M. S. and Timmerhaus, K. D. *Plant Design and Ecomonics for Chemical Engineering*. — 4th ed. — NY: McGraw-Hill, 1991.
29. Popper, H. *Modern cost Engineering Techniques*. — NY: McGraw-Hill, 1970.
30. Ratti, C. and Crapiste, G. H. *A generalized drying curve for shrinking food materials // Drying '92 / Mujumdar, A. S. (ed.)*. — NY: Elsevier, 1992. — P. 864–873.
31. Ratti, C. and Crapiste, G. H. *Determination of heat transfer coefficients during drying of foodstuffs // J. Food Proc. Eng.* — 1995. — № 18 — P. 41–53.
32. Ratti, C., Crapiste, G. H., and Rotstein, E. *Psychr: a computer program to calculate psychrometric propetries // Drying Technology*. — 1989. — № 7(3). — P. 575–580.
33. Sapakie, S. F. and Renshaw, T. A. *Economics of drying and concentration of foods // Engineering and Food*. — Vol. 2, Processing Applications / McKenna, R. M. (ed.). — NY: Elsevier Applied Sci., 1986. — P. 937–938.

34. Singh, R. P. and Heldman, D. R. Introduction to Food Engineering. — NY: Academic Press, 1985.
35. Sokhansanj, S. and Jayas, D. S. Drying of foodstuffs // Handbook of Industrial Drying / Mujumdar, A. S., (ed.). — NY: Marcel Dekker, 1987. — P. 517–554.
36. Strumillo, C. and Lopez-Cacicedo, C. Energy aspects in drying, in Handbook of Industrial Drying / Mujumdar, A. S. (ed.). — NY: Marcel Dekker, 1987. — P. 823–862.
37. Tragardh, C. Energy and energy analysis in some food processing industries // Lebensm.-Wiss. Technol. — 1981. — № 14. — S. 213–217.
38. Treybal, R. E. Mass-Transfer Operations. — 3rd ed. — NY: McGraw-Hill, 1980.
39. Van Arsdel, W. B., Copley, M. J., and Morgan, A. I. Food Dehydration. — 2nd ed. — Westport, CT: AVI Publishing, 1973.
40. Van Meel, D. A. Adiabatic convection batch drying with recirculation of air // Chem. Eng. Sci. — 1958. — № 9. — P. 36–44.
41. Vanecek, V., Markvart, M., and Drbohlav, R. Fluidized bed Drying. — London: Leonard Hill Books, 1966.
42. Van't Land, C. M. Industrial Drying Equipment. — NY: Marcel Dekker, 1991.
43. Whitaker, S. Forced convection heat transfer correlations for flow in pipes, past flat plates, single cylinders, single spheres, and for flow in packed beds and tube bundles // AIChE J. — 1972. — № 18(2). — P. 361–371.
44. Williams-Gardner, A. Industrial Drying. — London: Leonard Hill, 1971.

# 5 РАЗРАБОТКА И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕМБРАННЫХ СИСТЕМ

*Джатал Д. Маннапперума*

*Перевод В. Игнатовича под общ. ред. к. т. н., доцента В. М. Зюканова*

## Содержание

- 5.1 Введение
  - 5.1.1 Типы мембранной фильтрации
  - 5.1.2 Материалы и структуры мембран
  - 5.1.3 Мембранные модули
- 5.2 Основные принципы мембранного фильтрования
  - 5.2.1 Обратный осмос и процессы нанофильтрации
    - 5.2.1.1 *Модель переноса*
    - 5.2.1.2 *Оценка параметров модели*
    - 5.2.1.3 *Рабочие характеристики*
  - 5.2.2 Процессы микрофильтрации
    - 5.2.2.1 *Модель переноса*
    - 5.2.2.2 *Оценка параметров модели*
    - 5.2.2.3 *Рабочие характеристики*
  - 5.2.3 Процессы ультрафильтрации
    - 5.2.3.1 *Модель переноса*
    - 5.2.3.2 *Оценка параметров*
- 5.3 Проектирование мембранных систем
  - 5.3.1 «Порционные» системы
  - 5.3.2 Системы загрузка–выгрузка
  - 5.3.3 Однопроходная система
  - 5.3.4 Системы диафильтрации
  - 5.3.5 Система с параллельными потоками пермеата
  - 5.3.6 Испытание опытной установки
  - 5.3.7 Расчеты при конструировании опытного образца
    - 5.3.7.1 *«Порционная» система*

- 5.3.7.2 Система «загрузка–выгрузка»
- 5.3.7.3 Непрерывная система
- 5.3.8 Мембранные системы очистки
- 5.4. Работа мембранных систем
  - 5.4.1 Явления загрязнения
  - 5.4.2 Предварительная обработка
  - 5.4.3 Очистка мембран
  - 5.4.4 Управление мембранной системой
- 5.5 Применение мембран в пищевой промышленности
  - 5.5.1 Молочная промышленность
  - 5.5.2 Производство фруктовых и овощных соков
  - 5.5.3 Производство сахара
  - 5.5.4 Подсластители из кукурузы
  - 5.5.5 Виноделие и пивоварение
  - 5.5.6 Производство продуктов животного происхождения
  - 5.5.7 Переработка стоков
- 5.6 Экономические аспекты
  - 5.6.1 Стоимость мембран и мембранных систем
  - 5.6.2 Энергетические издержки
  - 5.6.3 Прочие затраты
  - 5.6.4 Экономическая оценка концентрирования сывороточного белка
  - 5.6.5 Экономическая оценка осветления сока
  - 5.6.6 Экономическая оценка концентрирования сока
  - 5.6.7 Экономическая целесообразность сокращения стоков

Список сокращений

Литература

## 5.1 Введение

Мембрана представляет собой селективно-проницаемую перегородку между двумя объемами, которая управляет массообменом между этими объемами, осуществляя отбор одних элементов смеси относительно других. Мембранный процесс позволяет осуществить выборочную передачу веществ из одного объема в другой, отделенный от первого мембраной.

Под такое определение мембранного процесса попадает большое число технологических операций — от просеивания до обратного осмоса. Данная глава посвящена более узкому типу мембранных технологий, называемых тангенциально-поточным фильтрованием или фильтрацией в поперечных потоках. Фильтрование частиц размером до микрона может быть осуществлено с помощью обычных статичных фильтров. Частицы, удерживаемые фильтром, образуют со временем плотный слой, который увеличивает сопротивление потоку и препятствует фильтрации, а это требует частой очистки или замены фильтров.

При тангенциально-поточном фильтровании поток под давлением нагнетается вдоль мембраны, и удерживаемые частицы «выметаются» так, что осадочный слой остается сравнительно тонким и сопротивление фильтрации остается относительно небольшим. Это позволяет поддерживать достаточно сильные потоки в течение продолжительного времени. Различие между двумя этими видами фильтрования показано на рис. 5.1.

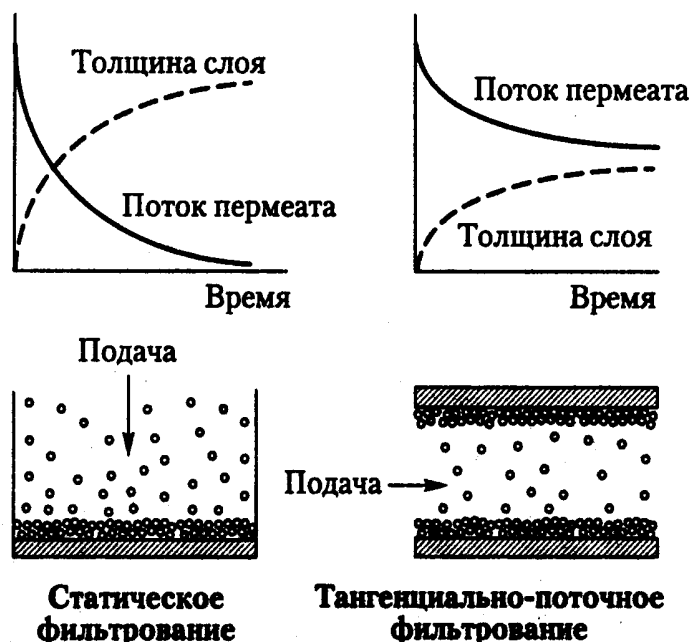


Рис. 5.1. Статическое и тангенциально-поточное фильтрование

### 5.1.1 Типы мембранной фильтрации

**Тангенциально-поточное мембранное фильтрование** применяется для отделения частиц размером около 10 мкм и растворенных молекул размером в несколько ангстремов. В зависимости от размера фильтруемых частиц процессы мембранной фильтрации делятся на 4 основных типа (см. схему на рис. 5.2, где приведены типы фильтрации применительно к пищевой промышленности).

**Микрофильтрация** — это самый «грубый» тип мембранной фильтрации, позволяющий отделять небольшие частицы из взвеси. Микрофильтрационные мембраны классифицируются по диаметру пор, соответствующему диаметру наименьших удерживаемых ими частиц (обычно это 0,1–10 мкм). Микрофильтрация требует наиболее низкого рабочего давления, обычно в районе 10–50 фунтов на кв. дюйм ( $\approx 210$  кПа).

**Ультрафильтрация** используется для отделения крупных макромолекул — например, белков и крахмалов. Мембраны для ультрафильтрации классифицируются по отделению на основе молекулярной массы (по молекулярной массе наименьшей молекулы, 90% которой удерживается мембраной). Диапазон ультрафильтрации — молекулярная масса вещества от 1000 до 500 000. По сравнению с микрофильтрацией ультрафильтрация требует более высокого давления, обычно 20–200 фунтов на кв. дюйм.

Мембраны **нанофильтрации** задерживают вещества с молекулярной массой от 100 до 1000. Мембраны нанофильтрации, подобно мембранам ультрафильтрации, классифицируются по отделению на основе молекулярной массы или по проценту отделения хлорида натрия (подобно мембранам на основе обратного осмоса). При нанофильтрации используется давление от 100 до 500 фунтов на кв. дюйм.

При **обратном осмосе** используют наиболее плотные мембраны, способные отделить даже мельчайшие молекулы растворенного вещества. Мембраны для обратного осмоса классифицируются по процентному отделению хлорида натрия из водного раствора



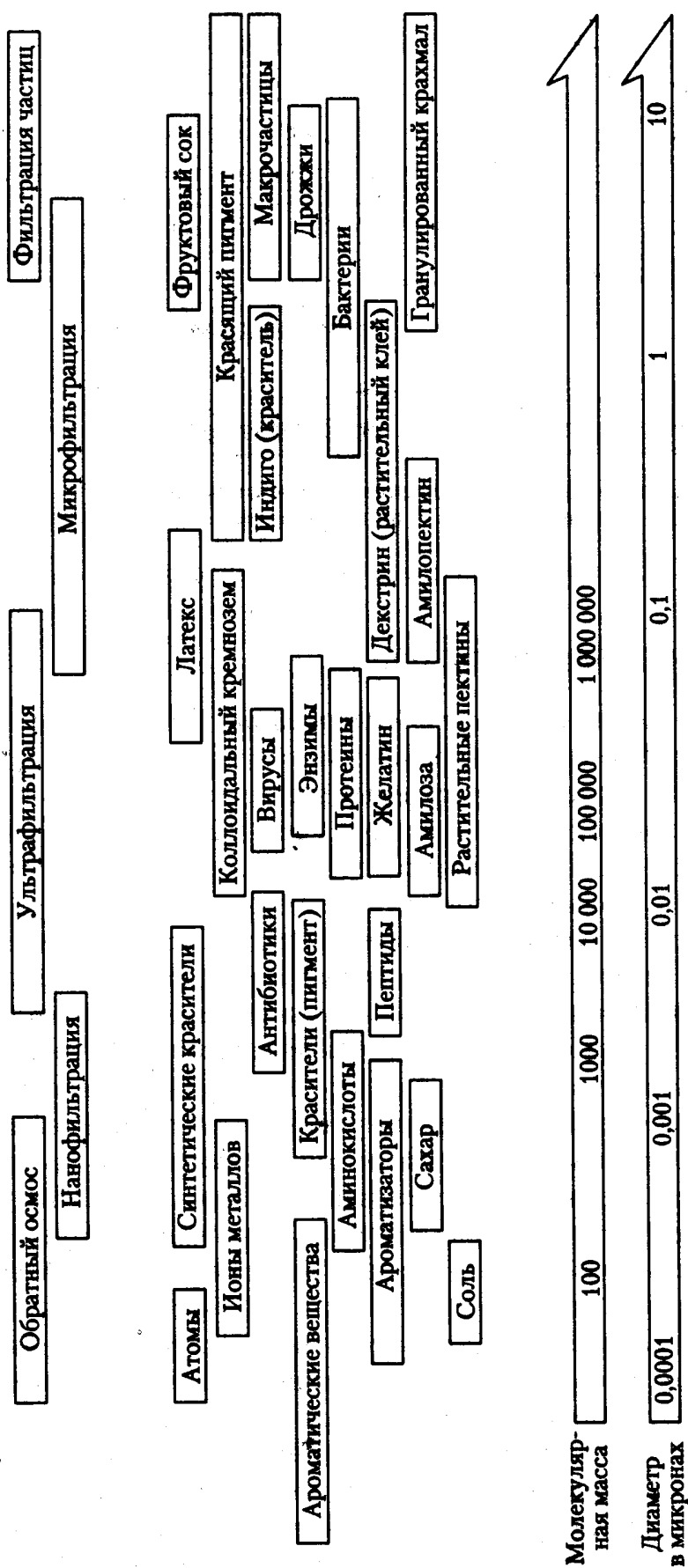
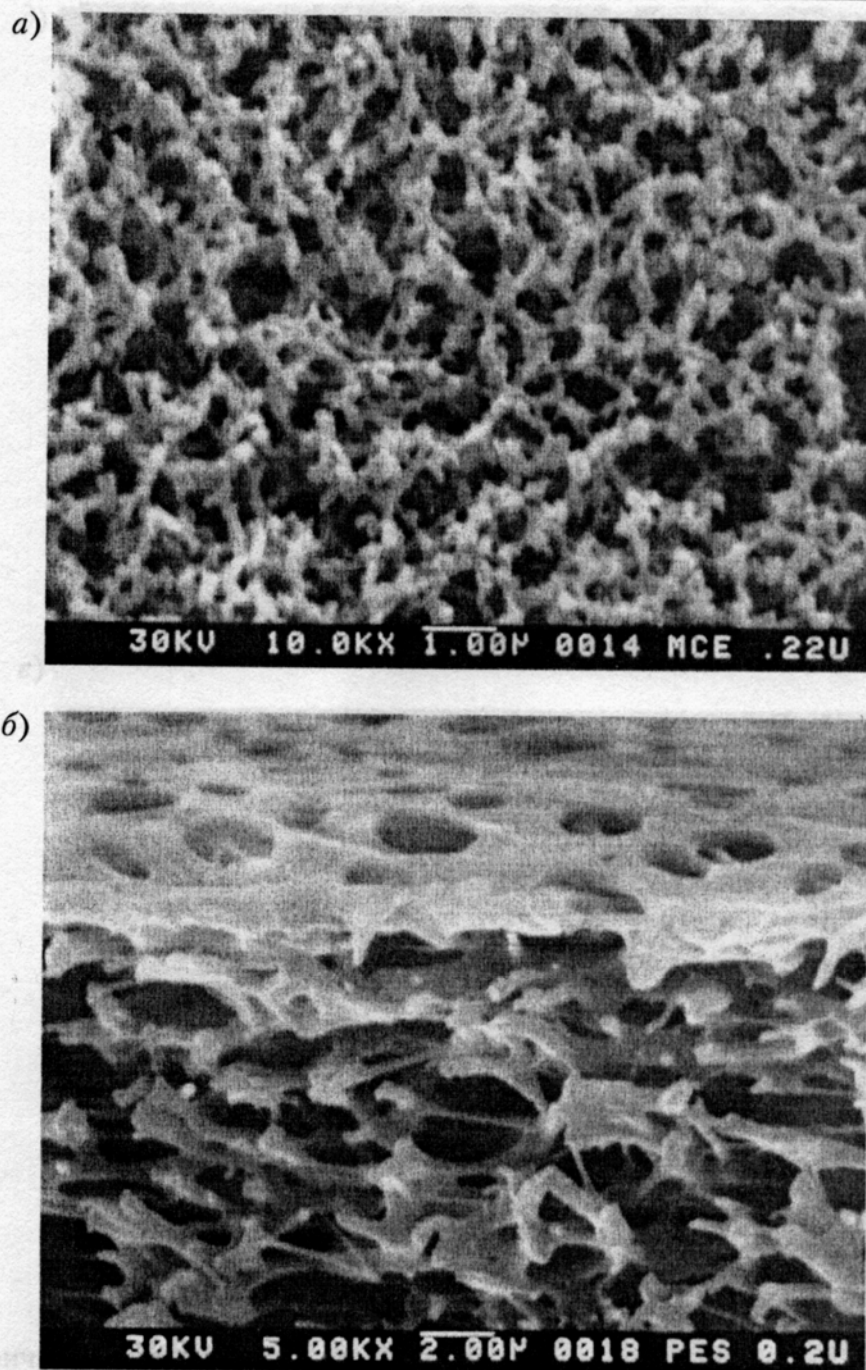


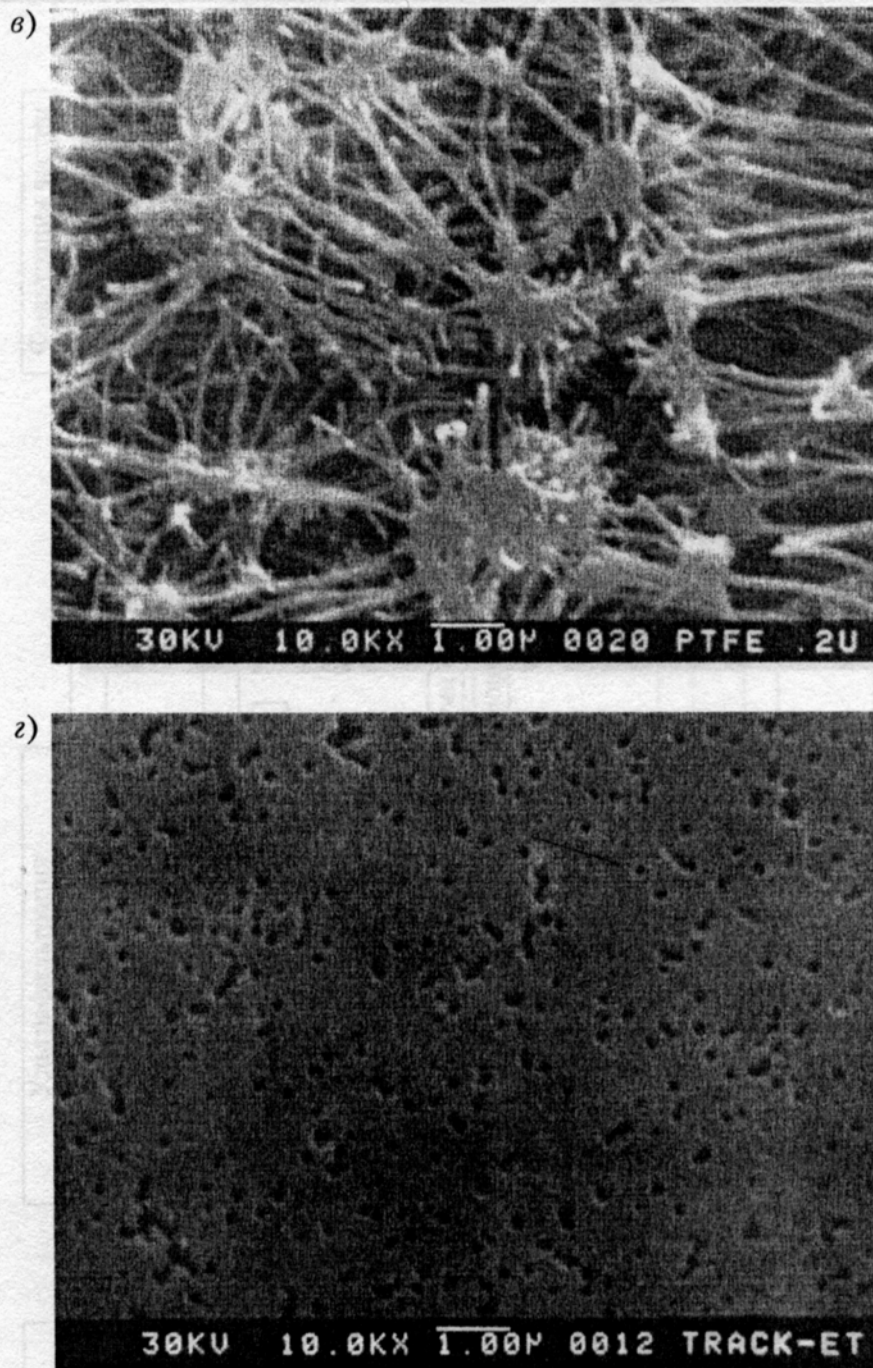
Рис. 5.2. Типы мембранной фильтрации



**Рис. 5.3.** Структура мембран: *а)* симметричная мембрана с микропорами (поперечное сечение) из сложного эфира целлюлозы с размером пор 2 мкм; *б)* асимметричная мембрана с микропорами (вид поверхности и поперечное сечение); полисульфон с размером пор 0,2 мкм

при определенных условиях (от 99,5 до 95%). Для преодоления высокого осмотического давления в растворах требуется высокое давление — от 200 до 1500 фунтов на кв. дюйм.

Рассматриваемые в этой главе мембранные процессы проходят под давлением и отделяют растворенные вещества прежде всего по размеру их частиц. Хотя применяемые в пищевой промышленности электродиализ и диффузионное испарение также являются мембранными процессами, они проходят не под давлением. Разделение не зависит от размера частиц растворенных веществ, в связи с чем мы их не рассматриваем.



**Рис. 5.3** (продолжение): *в*) растянутая мембрана с микропорами (вид поверхности); фторопласт (ПТФЭ) с номинальным размером пор 0,2 мкм; *з*) микрофильтрационная мембрана, получаемая путем травления (вид поверхности); поликарбонат с номинальным размером пор 0,1 мкм

### 5.1.2 Материалы и структуры мембран

Мембраны производятся из различных материалов — металлокерамики, керамики и полимерных материалов. В результате их обработки получают разнообразные структуры мембран — например, пористые, асимметричные, композитные и т. п. (микрофотографии некоторых из них приведены на рис. 5.3).



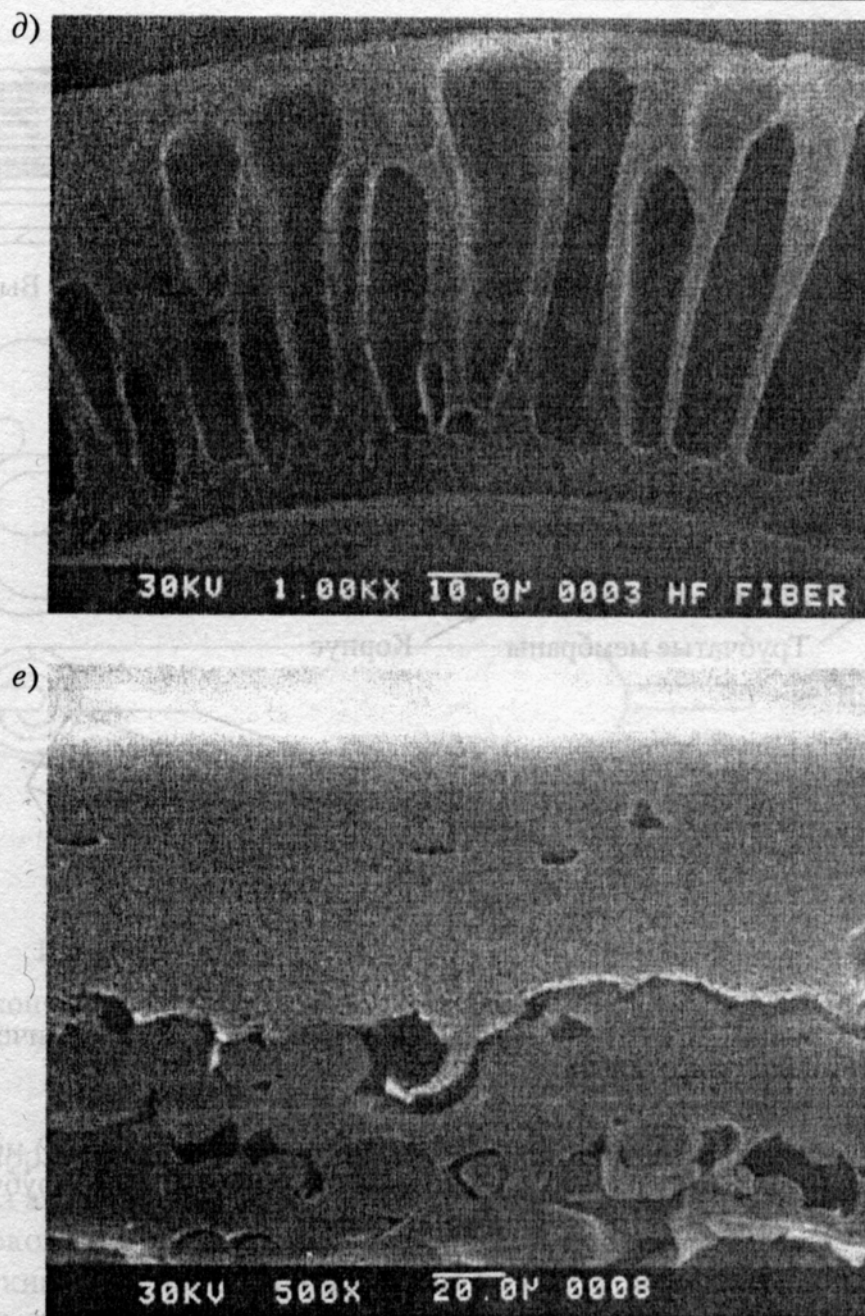


Рис. 5.3 (окончание): д) пористо-волоконная мембрана (поперечный разрез): полисульфон для отделения веществ с номинальной массой 500 000; е) композитная мембрана (поперечное сечение): поливинилспиртовая нанофильтрация

Для производства микрофильтрующих мембран с диаметром отверстий 0,1 мкм и более используются спеченные частицы металлов, окисей металлов, керамики и полимеров. Такие мембраны обычно симметричные, но асимметричные мембраны также состоят из слоев пористого материала, размеры пор которого постепенно уменьшаются. Хорошо себя зарекомендовали керамические материалы, позволившие уменьшить размер пор до 20 нм. В производстве нанофильтрационных мембран из керамических материалов успешно применяются зольгелиевые процессы.

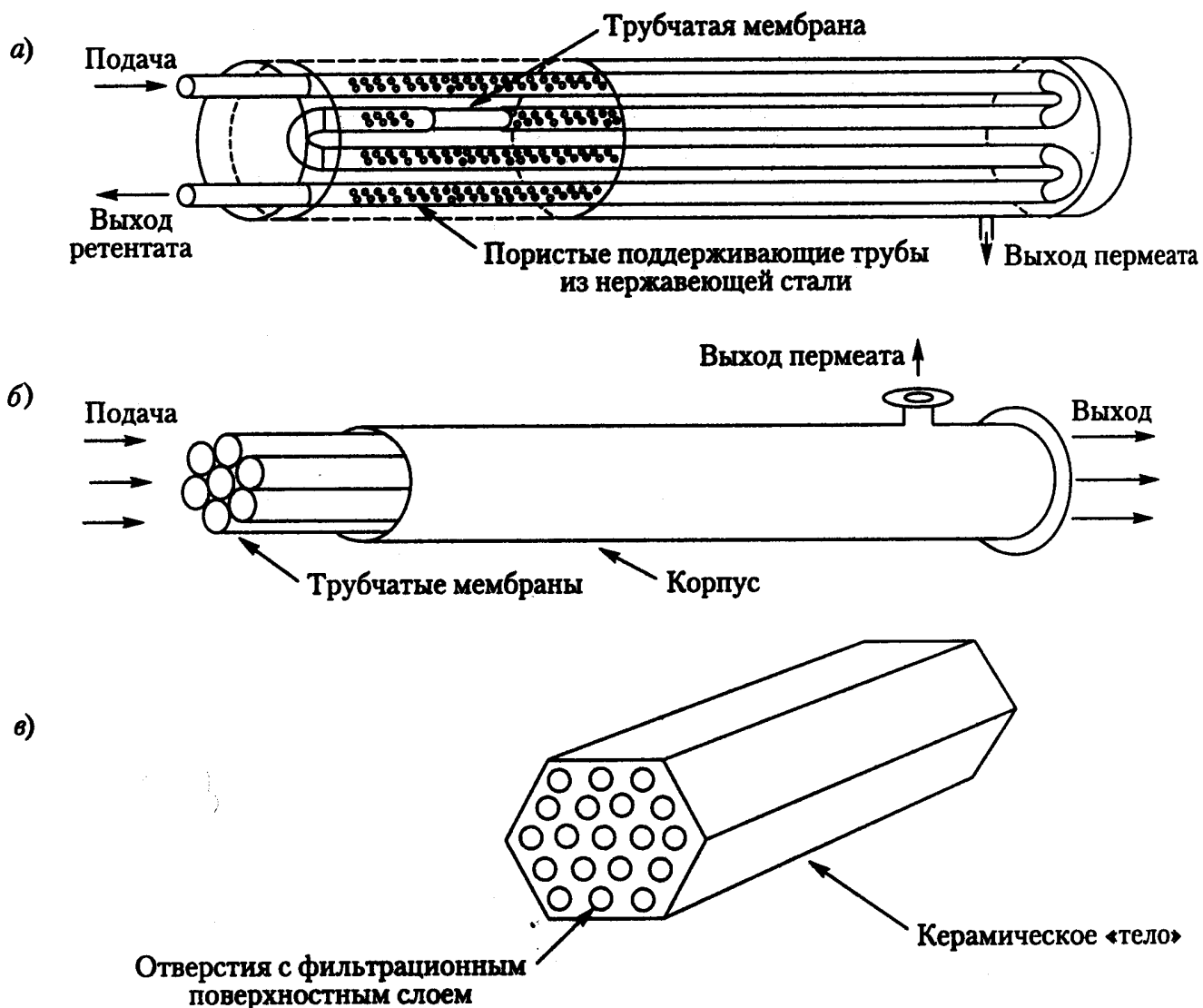


Рис. 5.4. Мембранные модули: а) трубчатый (поддерживаемый снаружи) мембранный модуль; б) трубчатый (самоподдерживающийся) мембранный модуль; в) трубчатый (монокристаллический) мембранный модуль

При производстве мембран путем травления полимерная пленка подвергается воздействию излучения, которое разрывает полимерные цепочки, а затем — травлению в химической ванне, где поврежденные области растворяются. Этим способом производят мембраны с цилиндрическими порами, причем диапазон размеров пор очень мал. Такие мембраны относятся к типу мембран для микрофильтрации и изготавливаются обычно из поликарбонатов и полиэфиров.

Основная масса микрофильтрационных мембран — это *полимерные мембраны с анизотропной структурой*. Приготавливается раствор полимера в растворителе, расплывается в виде тонкой пленки и затем охлаждается. После этого растворитель вымывается с образованием пористой структуры.

Важное место в фильтрации занимают *мембраны с изотропной структурой*. Процесс их производства включает операцию быстрого охлаждения с образованием тонкой оболочки, имеющей небольшие поры. Эта оболочка функционирует как разделяющий слой и поддерживается остальной частью мембраны, более толстой и с более

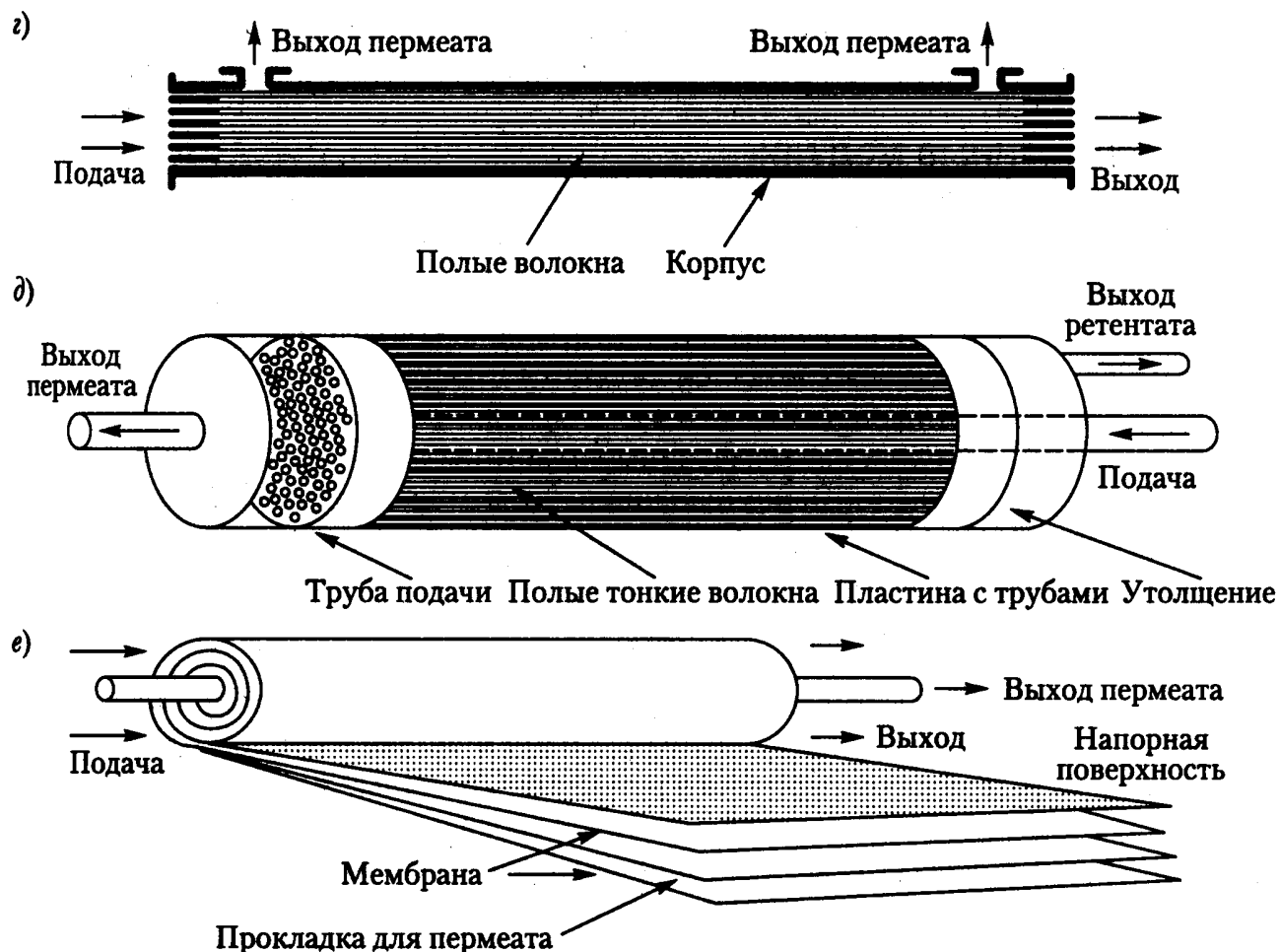


Рис. 5.4 (окончание): а) модуль из полого волокна; б) полый модуль из тонкого волокна; в) спиральный модуль

крупными порами для уменьшения сопротивления потоку жидкости. Изотропные мембраны из ацетата целлюлозы обычно имеют толщину 100 мкм, а слой оболочки составляет около 0,3 мкм. Мембраны из ароматических полиамидов скручиваются в тонкие волокна с внутренним диаметром 42 мкм, а внешним — 85 мкм.

*Композитные мембраны на основе обратного осмоса* производятся путем образования тончайшего слоя гидрофильного полимера на микропорах подложки. Для изготовления таких мембран применяется *межслойная полимеризация* поверхности пористой пленки, причем подложкой является полисульфон. Толщина такого пленочного слоя изменяется от 0,03 до 0,2 мкм.

В работе мембран важную роль играют материалы, из которых они изготовлены, и характеристики их поверхности. Гидрофильные материалы (например, ацетат целлюлозы) менее подвержены засорению поверхности маслянистыми веществами, чем гидрофобные (например, полисульфон). В качестве высокогидрофильного материала, применяющегося в мембранах для ультра- и микрофльтрации, используют полиакрилонитрил.

Для разделения коллоидных растворов, содержащих противоположно заряженные частицы, очень эффективны мембраны с поверхностным зарядом. Мембраны специального назначения изготавливают с применением сополимеризации, плазмен-

ной полимеризации и напыления. Производятся также самоочищающиеся мембраны (путем присоединения к поверхности мембран ферментов (энзимов)) [22].

### 5.1.3 Мембранные модули

Мембраны собирают в модули, которые легко komponуются в системы. Главная цель модульных конструкций — размещение больших площадей мембран в небольшом объеме для противодействия давлению и скоростям тангенциальных (касательных) потоков, необходимых для поддержания чистоты поверхности мембраны. Обычными конфигурациями подобных модулей являются плоские пластины, рулоны, тонкие полые волокна и спирали (см. рис. 5.4).

В пластинчатых модулях две мембранные пластины разделены опорной пластиной с каналами для пермеата. Такие «сэндвичи» из мембран разделены плоской распоркой с каналами подачи потока. Различные слои мембраны и пластины распорок собираются вместе и крепятся болтами. Такой модуль может выдерживать высокое давление, но он подвержен засорению взвешенными частицами.

*Трубчатые (рулонные)* модули, состоящие из мембран, свернутых в рулон (диаметром обычно 6–25 мм), бывают трех основных типов. *Самоподдерживающиеся трубчатые модули* состоят из нескольких рулонов мембран в едином блоке, соединенном с общим резервуаром пермеата и ретентата. Типичные модули состоят из 1, 7 или 19 рулонов. Данный тип модулей ограничен своей структурной прочностью при низком давлении. *Поддерживаемые снаружи трубчатые мембранные модули* состоят из рулонных мембран, расположенных внутри отдельных пористых поддерживающих труб. Несколько таких труб, подсоединенных к общим резервуарам пермеата и ретентата, образуют модуль, который может выдерживать высокое давление и, следовательно, применяться в агрегатах, работающих по принципу обратного осмоса. В *монолитных трубчатых модулях* несколько трубных каналов формируют пористый блок материала, а мембранный слой формируется внутри труб. Все типы трубчатых модулей могут задерживать взвешенные частицы.

*Полые волоконные модули*, состоящие из пучков полых волокон (обычно диаметром 0,5–3 мм), заделываются в пластиковые пакеты и собираются в проницаемых корпусах. Поток проходит через центральное отверстие, а пермеат собирается во внешнем корпусе. Полые волокна являются самоподдерживающимися и, следовательно, могут использоваться лишь при низком давлении. Они позволяют удерживать незначительное количество взвешенных частиц.

*Модули из полых тонких волокон* содержат тонковолоконные жилы диаметром около 50–100 мкм. Концы U-образного пучка волокон образуют единую головку, а сам пучок размещается в трубе. Подаваемая жидкость находится вне волокон, а пермеат в них проникает. Такой модуль выдерживает высокое давление, но очень подвержен засорению взвешенными частицами.

*Спиральные модули* получают путем размещения между двух слоев мембран пластмассовых сеток, действующих в качестве канала для пермеата, герметически закрывая три стороны. Четвертая сторона этого «сэндвича» подсоединяется к трубе пермеата, а другая пластиковая сетка, действующая в качестве канала подачи, расположена над ней, и все вместе они «обернуты» вокруг центральной подающей трубки. Такой модуль также выдерживает высокие давления, но подвержен засорению взвешенными частицами.

Таблица 5.1. Материалы мембран, структура, модули и диапазон фильтрования

Материал мембраны	Структура						Модуль						Диапазон фильтрования				
	Пористая симметричная	Пористая асимметричная	Пористая вытянутая	Протравленная	Анизотропная	Изотропная	Композитная	Пластинчатый	Трубчатый	Монолитный	Из полых волокон	Из тонких полых волокон	Спиральный	Микрофильтрация	Ультрафильтрация	Нанофильтрация	Обратный осмос
Полимеры																	
Ацетат целлюлозы					+	+		+	+			+	+			+	+
Полиамид							+	+	+			+	+			+	+
Сульфонированный полисульфон							+	+	+				+		+	+	+
Полисульфон					+	+		+	+				+	+	+		
Полиэфирсульфон					+	+		+					+	+	+		
Поливинилиденфторид					+	+		+	+		+		+	+	+		
Политетрафторэтилен			+					+	+				+	+			
Полипропилен					+			+			+			+			
Полиакронитрил					+	+		+			+		+	+	+		
Поликарбонат				+										+			
Полиэфир			+	+										+			
Керамика/металлы																	
Алюминий	+									+				+			
Цирконий/алюминий	+	+								+				+	+		
Цирконий/металл			+						+					+			
Цирконий/углерод			+						+					+			
Кремний	+								+								
Карбид кремния	+									+				+			
Оксид титана/металл			+						+					+			
Спеченная сталь	+							+	+					+			
Спеченные сплавы	+							+	+					+			

Различные материалы и виды модулей дают большое число возможных комбинаций для мембранных технологических процессов (табл. 5.1). Первым этапом конструирования мембранных систем является выбор соответствующего сочетания типа мембраны и материала.

В дополнение к пяти вышеописанным типам мембранных модулей существуют несколько частных и специализированных их вариантов. Трубная конфигурация с мембранным слоем вне трубки обладает преимуществом прочности, она удобна для наблюдения и обеспечивает физическую очистку засоренных слоев.



Модуль с переменным направлением потока состоит из полых волокон с фильтрующим слоем вне волокон, а поток ретентата направлен перпендикулярно волокнам. Сами волокна выступают в качестве турбулизаторов. В этих модулях для обратной промывки применяется сжатый газ. Появились и ротационные модули, состоящие из концентрических цилиндров и круглых дисков, которые применяются для работы со сверхзагрязненными жидкостями. В некоторых аналогичных случаях применяются пластинчатые модули, установленные на вращающейся вибрационной панели.

## 5.2 Основные принципы мембранного фильтрации

Тангенциально-поточное фильтрация — это технологический процесс под давлением. Смесь жидкости с твердыми веществами контактирует с мембраной так, что жидкость поступает сквозь мембрану. Удерживаемое твердое вещество потоком «прометается» по поверхности мембраны, а через мембрану проходит лишь небольшое количество твердых веществ.

Поток жидкости через мембрану обусловлен градиентом гидравлического давления. В случае обратного осмоса и нанофильтрации осмотическое давление раствора направлено навстречу фильтрационному давлению. При ультра- и микрофильтрации осмотическое давление пренебрежимо мало из-за высокого молекулярного веса растворенных веществ.

При обратном осмосе и нанофильтрации растворенные вещества проходят через мембрану благодаря диффузии, обусловленной градиентом концентрации. Существуют модели, позволяющие растворенному веществу проходить сквозь крупные поры мембраны. При ультра- и микрофильтрации растворенные вещества проходят через крупные мембранные поры. Поскольку растворенные вещества — это макромолекулы и отдельные частицы, их поток обычно пренебрежимо мал.

Растворенное вещество, которое не проходит через мембрану, накапливается в тонком граничном слое вблизи поверхности мембраны и приводит к изменению концентрации в направлении, противоположном фильтрации. Растворенное вещество благодаря градиенту концентрации диффундирует через этот граничный слой. Это явление, называемое *концентрационной поляризацией*, играет важную роль во всех разновидностях тангенциально-поточного фильтрации, причем механизм диффузии зависит от типа растворенного вещества.

Накопление растворенного вещества в граничном слое создает сопротивление потоку жидкости. При обратном осмосе и нанофильтрации оно невелико, но при ультра- и микрофильтрации гидравлическое сопротивление граничного слоя значительно и зачастую превышает сопротивление мембраны. Кроме того, макромолекулы и частицы, достигая на поверхности мембраны насыщения, формируют гелевые слои, которые оказывают дополнительное сопротивление.

Работа системы мембранного фильтрации оценивается с точки зрения ее способности давать за короткое время большие объемы фильтрата и степенью чистоты фильтрата относительно концентрации растворенного вещества. Для этого применяются два универсальных параметра — *поток пермеата* и *количество отфильтро-*

ванного вещества. Поток пермеата  $J$  определяется как объем пермеата, проходящего через единицу площади мембраны в единицу времени ( $\text{л/м}^2 \cdot \text{ч}$ ):

$$\text{Поток пермеата (проницаемость)} \quad J = \frac{\text{Объем пермеата}}{\text{площадь мембраны} \times \text{время}} \quad (5.1)$$

Количество отфильтрованного вещества определяется как отношение массы растворенного вещества, задержанного мембраной, к его массе в поступающем потоке, и обычно выражается в процентах.

$$\begin{aligned} &\text{Количество отфильтрованного вещества (селективность)} \times 100\% = \\ &= \left[ 1 - \frac{\text{Концентрация вещества в пермеате}}{\text{Концентрация вещества в исходном потоке}} \right]. \end{aligned} \quad (5.2)$$

Математическая модель тангенциально-поточного фильтрования включает два уравнения переноса через мембрану (для жидкости и растворенного вещества), два уравнения переноса через граничный слой (для жидкости и растворенного вещества) и уравнение непрерывности. Универсальная математическая модель может описать большое число процессов тангенциально-поточного фильтрования, однако явления переноса на «обратноосмосном» конце спектра фильтрования коренным образом отличаются от явлений на его «микрофильтрационном» конце. Следовательно, характеристику мембранного фильтрования следует давать, используя две отдельные модели для разных концов этого спектра.

## 5.2.1 Обратный осмос и процессы нанофильтрации

Обратный осмос заключается в фильтровании растворов под давлением, превышающим осмотическое, через полупроницаемые мембраны, пропускающие растворитель и задерживающие растворенное вещество. В основе метода лежит явление осмоса — самопроизвольного перехода растворителя через полупроницаемую мембрану в раствор. Давление, при котором наступает равновесие, называется осмотическим. Если со стороны раствора приложить давление, превышающее осмотическое, то перенос растворителя будет происходить в обратном направлении, что и нашло отражение в названии процесса.

Осмотическое давление является общим термодинамическим свойством растворов, зависящим от количества частиц растворенного вещества в растворе. Поэтому раствор с низкой молекулярной массой растворенного вещества (например, хлорида натрия) будет иметь более высокое осмотическое давление, чем раствор с частицами большой молекулярной массы (например, белка), при одинаковой массе растворенного вещества. Обратный осмос требует более высоких рабочих давлений, чем ультрафильтрация.

### 5.2.1.1 Модель переноса

Обратный осмос и нанофильтрацию применяют для растворов с небольшими молекулами (например, солей и сахаров), где осмотическое давление по сравнению с не-

обходимым гидравлическим давлением становится существенным. Гидравлическое сопротивление пограничного слоя для конвективного потока жидкости становится пренебрежимо малым и, следовательно, уравнения переноса для потока жидкости через пограничный слой не требуется. Потоки и изменения давления и концентрации при обратном осмосе приведены на рис. 5.5.

Поток жидкости через мембрану вызван разницей гидравлического давления, превышающего перепад осмотического давления в мембране. Этот поток должен преодолеть гидравлическое сопротивление мембраны, и данный процесс описывается уравнением 5.3:

$$J = \frac{1}{r_m} [(P_1 - P_2) - (\Pi_2 - \Pi_3)]. \quad (5.3)$$

Поток растворенного вещества через мембрану обуславливается различием в концентрации и должен преодолеть диффузионное сопротивление мембраны. Это сопротивление принято выражать как проницаемость:

$$S = k_m (c_2 - c_3). \quad (5.4)$$

Растворенное вещество перемещается через пограничный слой к мембране потоком жидкости, и в это же время не прошедшее через фильтр растворенное вещество относится от мембраны обычной диффузией. Этот диффузный поток описывается уравнением 5.5:

$$S = -D \frac{dc}{dy}. \quad (5.5)$$

Поток растворенного вещества, возникающий из-за потока жидкости в противоположном направлении, равен диффузному потоку:

$$D \frac{dc}{dy} = J(c - c_3). \quad (5.6)$$

Уравнение 5.6 интегрируется по толщине пограничного слоя  $\delta$ , и мы получаем уравнение 5.7:

$$J = \frac{D}{\delta} \ln \frac{c_2 - c_3}{c_1 c_3}. \quad (5.7)$$

Отношение  $D/\delta$  представляет собой не что иное, как коэффициент массоотдачи  $\beta$  растворенного вещества от поверхности мембраны в объем раствора. Тогда получим:

$$J = \beta \ln \frac{c_2 - c_3}{c_1 c_3}. \quad (5.8)$$

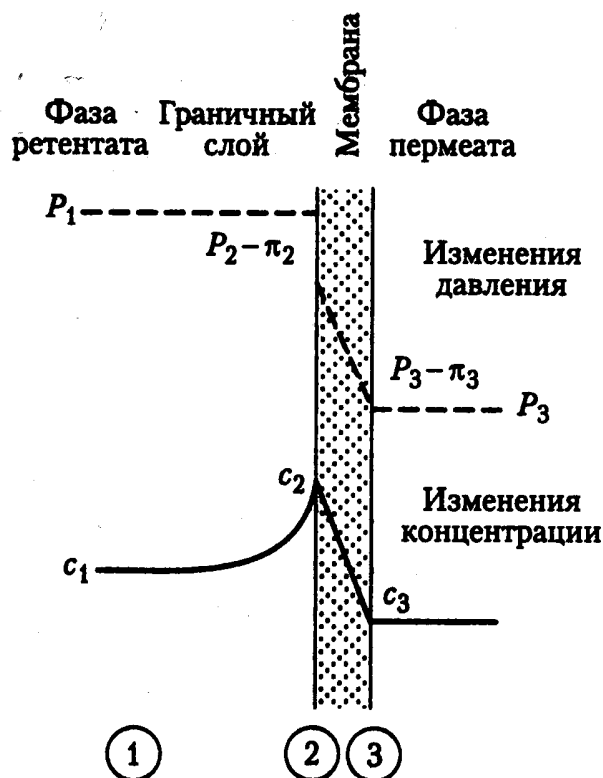


Рис. 5.5. Модель переноса при обратном осмосе

Дополнительная взаимосвязь между потоками жидкости и растворенного вещества обеспечивается условием непрерывности:

$$S = Jc_3. \quad (5.9)$$

Уравнения (5.3), (5.4), (5.8) и (5.9) отражают прохождение жидкости и растворенного вещества через мембрану и пограничный слой при обратном осмосе. Эта несложная модель состоит из четырех уравнений с 12 элементами, включающими три концентрации растворенного вещества, два гидравлических давления, два осмотических давления, три характеристики (свойства) переноса и два потока.

Эту модель можно использовать для определения четырех из этих 12 элементов (если другие 8 известны). В идеале определяют два потока ( $J$  и  $S$ ) и две концентрации ( $c_2$  и  $c_3$ ), если известны другие параметры. Тем не менее сама природа такой модели и взаимозависимость параметров друг от друга делают эту задачу весьма затруднительной. Для потоков и концентраций эти уравнения не могут быть решены в явном виде в связи с тем, что отношение между  $\Pi_2$  и  $c_2$  нелинейно, а отношение «поток-концентрация» — логарифмическое [см. уравнение (5.7)].

### 5.2.1.2 Оценка параметров модели

Модели переноса представлены во многих литературных источниках. К таким параметрам относят давление, концентрацию, температуру и скорость тангенциального потока. Существенную часть модели формируют базовые отношения, описывающие зависимости между указанными параметрами.

**Осмотическое давление** — это термодинамическая характеристика растворов, проявляющаяся в присутствии полупроницаемой мембраны. В разбавленном растворе осмотическое давление может определяться по уравнению Вант Гоффа (*van't Hoff*) (5.10), а при более высоких концентрациях — по уравнению Гиббса (*Gibbs*) (5.11). В табл. 5.2 для сравнения приведены значения, рассчитанные по вышеуказанным уравнениям, и экспериментальные данные.

- по уравнению Вант Гоффа:

$$\Pi = cRT; \quad (5.10)$$

- по уравнению Гиббса:

$$\Pi = -\frac{RT}{V} \ln x. \quad (5.11)$$

На практике основной интерес представляют изменения осмотического давления, обусловленные изменением концентрации растворенного вещества, которые при низких концентрациях можно считать линейными. Этот факт используется при представлении уравнения (5.3) в виде, соответствующем (5.12):

$$J = \frac{1}{r_m} [(P_1 - P_3) - a(c_2 - c_3)]. \quad (5.12)$$

**Коэффициент массоотдачи в пограничном слое  $\beta$**  — это гидродинамическая характеристика, и ее можно с достаточной точностью спрогнозировать для простых гео-

Таблица 5.2. Осмотическое давление растворов сахарозы в воде при 25 °C

Содержание сахара (%массе)	Осмотическое давление (атм)		
	Экспериментальные данные	По Вант Гоффу	По Гиббсу
3,31	2,65	2,39	2,46
6,41	5,19	4,68	4,99
9,31	7,79	6,88	7,53
12,04	10,38	8,99	10,13
14,61	13,05	11,03	12,75
17,03	15,76	12,98	15,43
19,32	18,59	14,86	18,18
21,49	21,44	16,68	20,94
23,55	24,34	18,42	23,77
25,50	27,29	20,11	26,68
40,63	58,6 <sup>a</sup>	35,92	58,25
50,66	95,8 <sup>a</sup>	46,87	94,66
57,78	141,2 <sup>a</sup>	55,30	134,74
63,11	193,0 <sup>a</sup>	61,98	177,55

<sup>a</sup> при 30 °C.

метрических решений при помощи безразмерных корреляций массоотдачи [25], увязывающих критерий Шервуда с критериями Рейнольдса и Шмидта.

Формирующийся ламинарный поток

$$Sh = 0,664 Re^{0,5} Sc^{0,33} \left[ \frac{d_3}{L} \right]^{0,5} \quad (5.13)$$

Полностью сформированный ламинарный поток

$$Sh = 1,62 Re^{0,33} Sc^{0,33} \left[ \frac{d_3}{L} \right]^{0,33} \quad (5.14)$$

Турбулентный поток

$$Sh = 0,023 Re^{0,8} Sc^{0,33} \quad (5.15)$$

Для установления этих корреляций следует знать характеристики раствора — коэффициент диффузии  $D$  и вязкость  $\nu$ ; параметры системы — эквивалентный диаметр  $d_3$  и длину канала  $L$ ; скорость тангенциального потока жидкости  $U$ . Данные относительно коэффициента диффузии и вязкости имеются лишь для ограниченного количества растворимых веществ. В работе [32] приведены эти параметры для растворов некоторых солей и сахарозы в воде в широком диапазоне их концентраций.

**Мембранные характеристики переноса.** Сопротивление мембраны при переносе жидкостей  $r_m$  и проницаемость мембраны для переноса растворенного вещества  $k_m$  определяются экспериментальным путем. В литературе приводятся данные в основном по экспериментальным мембранам и очень редко — по мембранам промышленного производства. Данные по потокам пермеата и ретентата на практике должны быть получены при строго определенных значениях давления, температуры и концентрации. Для мембран, работающих на принципе обратного осмоса, стандартным раствором является хлорид натрия, а для мембран нанофильтрации — сульфат магния, глюкоза и сахароза.

### 5.2.1.3 Рабочие характеристики

В связи с отсутствием необходимых параметров математические модели процесса обратного осмоса редко используются для прогнозирования потоков пермеата и ретентата. Тем не менее благодаря прогнозу параметрической зависимости работы мембраны эти модели дают ценное понимание сути процесса. Работа системы обратного осмоса количественно выражается через потоки ретентата и пермеата. На эти два параметра прежде всего влияют концентрация, давление, скорость и температура потока жидкости.

Существование пограничного слоя дает неоднозначность в определении потока ретентата. Кажущийся ретентат определяется относительно концентрации в растворе (5.16), а истинный — относительно концентрации у поверхности мембраны (5.17). В данной главе понятие «ретентат» относится к «кажущемуся ретентату».

$$\text{Кажущийся ретентат} = 1 - \frac{c_3}{c_1} \quad (\text{наблюдаемая селективность}). \quad (5.16)$$

$$\text{Истинный ретентат} = 1 - \frac{c_3}{c_2} \quad (\text{истинная селективность}). \quad (5.17)$$

С ростом напорного давления поток пермеата увеличивается, но растет и осмотическое давление у поверхности мембраны, которое противодействует увеличению потока пермеата. Напорное давление непосредственно на поток ретентата не влияет. Следовательно, с увеличением давления объем ретентата увеличивается, однако увеличение концентрации у поверхности мембраны увеличивает поток ретентата косвенным образом, регулируя таким образом его объем.

С ростом температуры увеличиваются потоки и пермеата, и ретентата. Увеличение потока пермеата происходит обратно пропорционально вязкости. Увеличение потока ретентата сопровождается увеличением диффузии и растворимости. В общем, поток ретентата с увеличением температуры растет быстрее, чем поток пермеата, что в результате дает уменьшение объема ретентата.

С ростом концентрации растворенного вещества поток пермеата уменьшается благодаря увеличению осмотического давления, а поток ретентата увеличивается. Это вызывает увеличение концентрации растворенного вещества в пермеате. В результате происходит уменьшение объема ретентата с увеличением в нем концентрации растворенного вещества.

Тангенциальная скорость напорного потока влияет на коэффициент массоотдачи  $\beta$  в пограничном слое, который увеличивается с ростом тангенциальной скорости до дробного показателя степени, зависящего от режима потока и других гидродинамических характеристик. Для ламинарного потока этот показатель степени равен примерно 0,3, а для турбулентного — 0,8. Увеличение  $\beta$  вызывает рост потока пермеата, причем это увеличение обусловлено ростом осмотического давления. Объем ретентата увеличивается с ростом скорости и меняется примерно так же, как и в зависимости от изменений давления.

Еще одним важнейшим параметром, влияющим на работу мембраны, является показатель кислотности pH. Влияние pH на поток пермеата и объем ретентата зависит от ионных характеристик растворенного вещества и мембраны. Следовательно, невозможно представить общие рабочие характеристики в зависимости от pH. Зависимость потока пермеата и объемов ретентата от технологических характеристик при обратном осмосе представлена на рис. 5.6.

## 5.2.2 Процессы микрофльтрации

Микрофльтрация подразумевает отделение небольших частиц микронных размеров (обычно от 0,1 до 10 мкм). Осмотическое давление здесь играет незначительную роль, поскольку частицы относительно велики, а их количество в данном объеме мало. Частицы, не прошедшие через мембрану, накапливаются на ее поверхности, образуя плотный слой. Гидравлическое сопротивление этого слоя конвективному потоку жидкости становится существенным (потоки, изменения давлений и концентрации при микрофльтрации представлены на рис. 5.7).

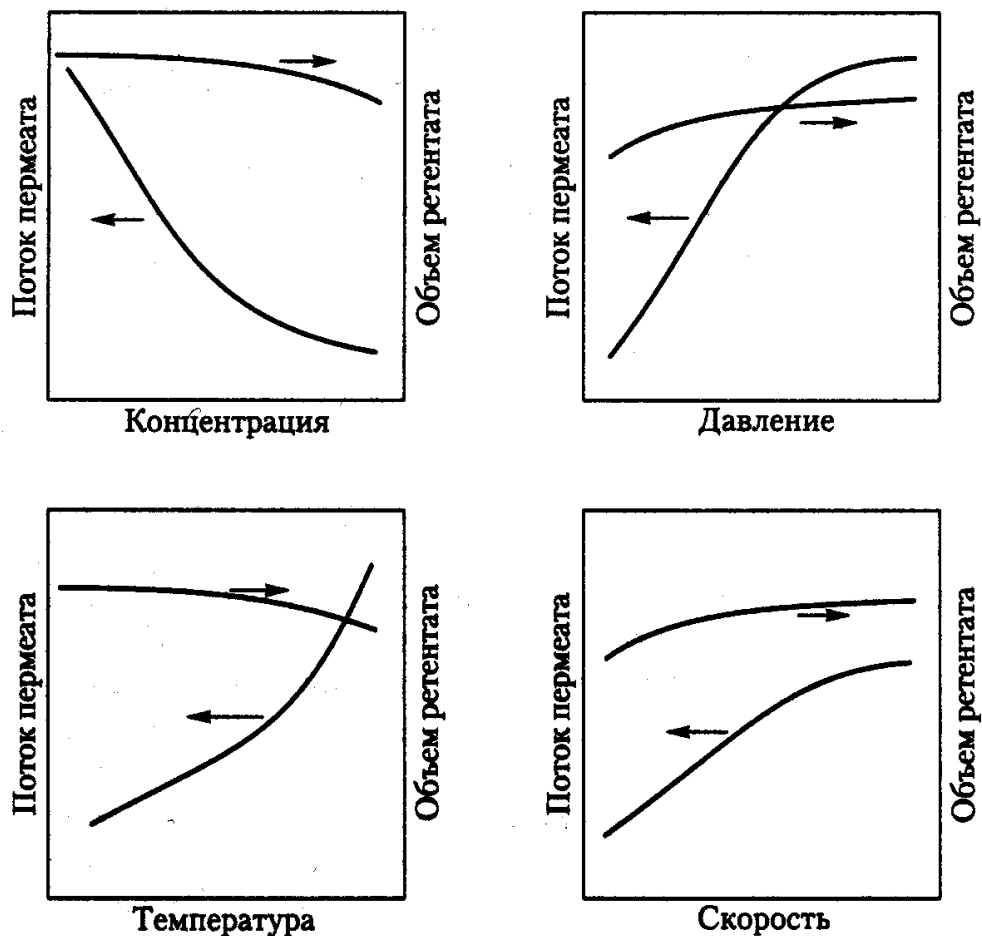


Рис. 5.6. Рабочие характеристики при обратном осмосе

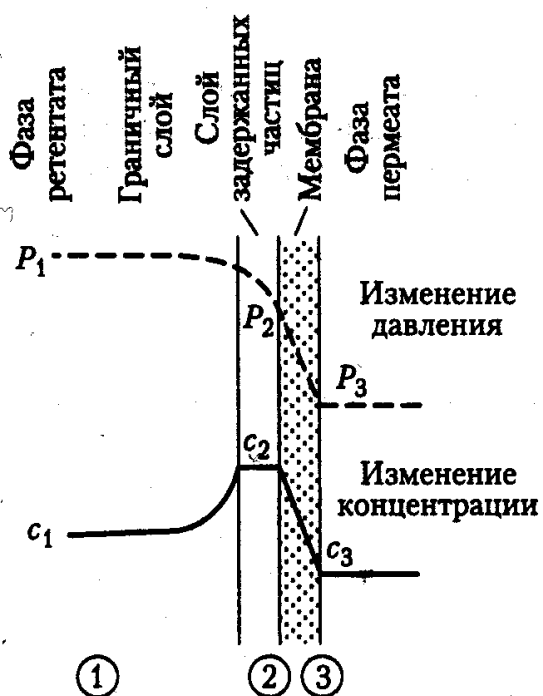


Рис. 5.7. Модель переноса при микрофильтрации



### 5.2.2.1 Модель переноса

Модель переноса при микрофильтрации строится на основе уравнений для потока жидкости через мембрану (5.18), потока жидкости через слой задержанных частиц (5.19) и переноса растворенного вещества через пограничный слой (5.5). Поскольку растворенное вещество не проходит через мембрану, уравнения для его потока и уравнение непрерывности не нужны:

$$J = \frac{1}{r_m}(P_2 - P_3); \quad (5.18)$$

$$J = \frac{1}{r_b}(P_1 - P_2). \quad (5.19)$$

Диффузный поток растворенного вещества через любое сечение пограничного слоя (5.5) равен потоку растворенного вещества в противоположном направлении под воздействием общего потока; интегрируя по толщине пограничного слоя  $\delta$ , получим:

$$J = \frac{D}{\delta} \ln \frac{c_1}{c_2}. \quad (5.20)$$

Поскольку определение толщины пограничного слоя  $\delta$  вызывает трудности, обычно заменяют отношение  $D/\delta$  на  $\beta$ :

$$J = \beta \ln \frac{c_2}{c_1}. \quad (5.21)$$

Концентрация не прошедших через фильтр частиц у поверхности мембраны в условиях микрофильтрации быстро достигает уровня насыщения. При выполнении этого условия  $c_2$  заменяют константой  $c_c$  (концентрация в намывном слое).

$$J = \beta \ln \frac{c_c}{c_1}. \quad (5.22)$$

Принято также суммировать уравнения (5.18) и (5.19) для исключения  $P_2$ , что дает:

$$J = \frac{1}{r_b + r_m}(P_1 - P_3). \quad (5.23)$$

Уравнение (5.23) вместе с уравнениями (5.21) или (5.22) образуют математическую модель переноса в микрофильтрационных процессах. Уравнение (5.21) применяется в случае, когда не учитывается слой задержанных частиц, а (5.22) — с его

учетом. В данной модели учитывается лишь одна характеристика мембраны и три характеристики пограничного слоя или слоя задержанных частиц. Единственная характеристика мембраны  $r_m$  по сравнению с  $r_b$  (характеристикой пограничного слоя) в практических условиях становится несущественной, поэтому процесс микрофильтрации почти полностью зависит от характеристик пограничного слоя.

### 5.2.2.2 Оценка параметров модели

Модель переноса содержит четыре параметра ( $r_m$ ,  $r_b$ ,  $\beta$  и  $c_c$ ), которые необходимы для прогнозирования потока пермеата.

Сопротивление мембраны  $r_m$  может легко быть определено опытным путем с использованием чистой воды и расчета уклона кривой отношения «поток–давление». Сопротивление мембраны с известным распределением размеров пор рассчитывается также с помощью уравнения Хагена–Пуазейля (*Hagen–Poiseuille*) для капиллярного потока:

$$r_m = \frac{128\mu b}{\pi \sum [n_p d_p^4]} \quad (5.24)$$

Гидравлическое сопротивление слоя задержанных частиц  $r_b$  может быть определено, если этот слой несжимаем согласно формуле Кармен–Козени (*Carmen–Kozeny*), заданной уравнением (5.25). Если для жестких сферических поверхностей площадь поверхности  $S_c$  равна  $3/r_s$ , то доля случайным образом сформированного слоя  $\epsilon$  — примерно 0,4. Коэффициент  $K$  равен примерно 5.

$$r_c = \frac{K(1-\epsilon)^3 S_c^2 \delta_c}{\epsilon^3} \quad (5.25)$$

Коэффициент массоотдачи  $\beta$  может быть оценен с помощью раствора Левека (*Leveque*), применяемого в аналогичной задаче для расчета теплопередачи в ламинарном потоке в трубе [33]. Среднее значение  $\beta$  по трубе длиной  $L$  при формирующемся ламинарном потоке —

$$\beta = 0,807 \left( \frac{\gamma_w D^2}{L} \right)^{1/3} \quad (5.26)$$

Значение коэффициента диффузии растворенного вещества  $D$ , используемый в уравнении (5.26), является вопросом дискуссионным. Коэффициент диффузии, выражаемый уравнением Стокса–Эйнштейна (*Stokes–Einstein*), при расчете дает заниженные значения  $\beta$  вследствие потока пермеата [30, 33]; коэффициент диффузии при сдвиге (уравнение 5.27), как следует из литературы, гораздо лучше согласуется с экспериментальными данными [33].

$$D = 0,0075 d_p^2 \gamma_w \quad (5.27)$$

Таблица 5.3. Параметры некоторых взвесей

Взвесь (суспензия)	$c_c$ , % об.	$r_s$ , мкм
Бычья кровь	95	3,0
Цельная кровь	95	4,2
Кровяные пластинки	90	1,5
Микроорганизмы	69	1,0/0,6
Праймер	70	1,0
Глина	70	5,0/0,6
Частицы латекса	75	0,25

По [33].

Коэффициент массоотдачи с учетом диффузии выражается уравнением 5.28, с помощью которого можно предсказать строгую линейную зависимость, и, следовательно, он лучше коррелирует с экспериментальными данными.

$$\beta = 0,078 \left( \frac{d_p^4 \gamma_w^3}{16L} \right)^{1/3} \quad (5.28)$$

Концентрация в слое не прошедших через мембрану частиц  $c_c$  достигает теоретически максимального значения 0,74 для жестких сфер шестиугольной компоновки. Тем не менее для гибких частиц типа красных кровяных телец (тромбоцитов) наблюдались и значения 0,9. Большие значения могут наблюдаться и у смесей частиц различного размера. В макромолекулярных растворах (например, белках и крахмалах) наблюдаются более низкие значения  $c_c$  — от 0,2 до 0,4. Концентрации некоторых часто встречающихся при микрофильтрации частиц в таком слое приведены в табл. 5.3.

### 5.2.2.3 Рабочие характеристики

Использовать математическую модель микрофильтрации для прогнозирования потока пермеата затруднительно в связи со сложностью точной оценки параметров модели. Тем не менее эту модель можно применять для анализа рабочих характеристик, являющихся чрезвычайно полезными в понимании процесса микрофильтрации.

Поток пермеата при микрофильтрации увеличивается с ростом давления, но растет и сопротивление граничного слоя  $r_b$ , приводя к нелинейной тенденции его изменения. Концентрация у поверхности мембраны не прошедших через нее веществ,  $c_2$ , также растет с увеличением потока вплоть до начала формирования намывного слоя. С дальнейшим ростом давления толщина и насыщение этого слоя увеличиваются, повышая его гидравлическое сопротивление  $r_b$ .

Поток пермеата с увеличением концентрации в напорном потоке  $c_1$  уменьшается. Одновременно увеличивается концентрация растворенного вещества у поверхности мембраны  $c_2$  (до начала формирования намывного слоя). В этот момент  $c_2$  становится постоянной и равной  $c_c$ , и уменьшение потока выражается логарифмической

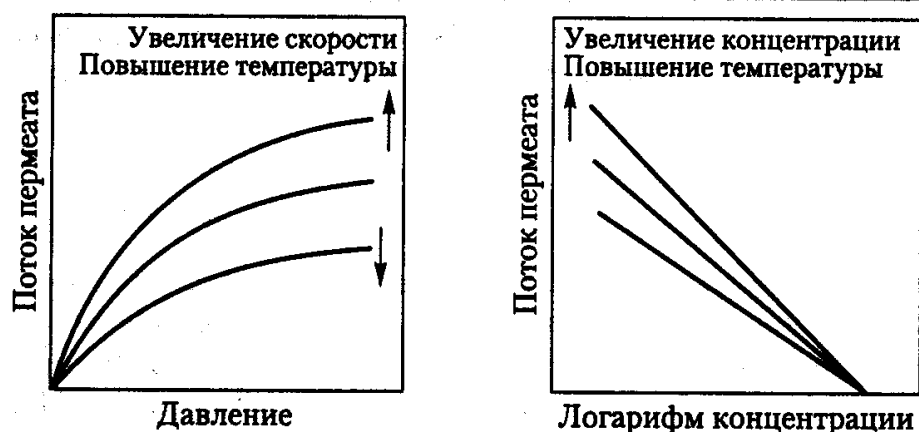


Рис 5.8. Рабочие характеристики при микрофильтрации

функцией с единственной переменной  $c_1$ . Зависимость потока пермеата от давления и концентрации в процессе микрофильтрации показана на рис. 5.8.

### 5.2.3 Процессы ультрафильтрации

Ультрафильтрация — это разделение макромолекул и коллоидных взвесей молекулярной массой от 1000 до примерно 500 000. Размер пор мембраны — от нескольких нанометров до 0,1 мкм.

При ультрафильтрации задерживаются молекулы и частицы с размерами, превышающими размер пор мембраны (аналогично микрофильтрации). Мембраны, применяемые при ультрафильтрации, сконструированы на базе мембран для обратного осмоса, а не на основе мембран для микрофильтрации. Дело в том, что сопротивление пор обратно пропорционально четвертой степени их диаметра. Для достижения одинаковых потоков пермеата требуется, чтобы ультрафильтрационные мембраны были в несколько раз тоньше мембран для микрофильтрации.

#### 5.2.3.1 Модель переноса

Математическая модель переноса при ультрафильтрации состоит из уравнений (5.21)–(5.23), полученных для процесса микрофильтрации. Изменения давления и концентрации, а также собственно математическая модель ультрафильтрации сходны с микрофильтрационными, однако здесь несколько более значимым становится осмотическое давление, поскольку частицы меньше, а количество их в данном объеме больше. Следовательно, зависимость потока пермеата от давления при ультрафильтрации может быть представлена двумя различными моделями, известными как «модель на основе сопротивления» и «модель на основе осмотического давления».

Модель на основе сопротивления [17] строится на базе предположения о том, что повышение давления увеличивает поток, который уплотняет пограничный слой. Увеличение гидравлического сопротивления пограничного слоя, вызванное таким уплотнением, затем противодействует увеличению потока. Математическое выражение этой модели предполагает, что гидравлическое сопротивление пограничного слоя увеличивается пропорционально перепаду давления:

$$\eta_b = \phi(P_1 - P_2). \quad (5.29)$$

Уравнение (5.29) подставляется в (5.23) и преобразуется таким образом, чтобы получить формулу зависимости потока от давления:

$$J = \frac{(P_1 - P_3)}{r_m + \phi(P_1 - P_3)}. \quad (5.30)$$

В модели на основе осмотического давления полностью пренебрегают гидравлическим сопротивлением пограничного слоя. Модель строится исходя из гипотезы, что повышение давления увеличивает концентрацию растворенного вещества у поверхности мембраны, а следовательно, и осмотическое давление. Последнее противодействует увеличению потока. Уравнение (5.3) модели обратного осмоса модифицируется таким образом, что пренебрегают осмотическим давлением пермеата ( $\Pi_3 = 0$ ). Осмотическое давление у поверхности мембраны  $\Pi_2$  принимается как функция от концентрации  $c_2$ , и подставляется в уравнение (5.31):

$$J = \frac{(P_1 - P_3) - f[c_1 \exp(J/\beta)]}{r_m}. \quad (5.31)$$

И модель на основе сопротивления (5.30), и модель на основе осмотического давления (5.31) корректно отражают экспериментально наблюдаемое изменение давления потока. Причина этого может заключаться в воздействии концентрационной поляризации.

### 5.2.3.2 Оценка параметров

При ультрафильтрации модель переноса также содержит четыре параметра ( $r_m$ ,  $r_b$ ,  $\beta$  и  $c_e$ ), которые для прогнозирования потока пермеата необходимо определить. Оценка этих параметров являлась предметом различных исследований.

*Сопротивление мембраны  $r_m$*  может быть экспериментально определено с помощью воды или рассчитано при помощи уравнения (5.24), если известно распределение размера пор (аналогично микрофильтрации).

*Гидравлическое сопротивление намытого слоя  $r_b$*  для макромолекулярных компонентов наилучшим образом определяется экспериментальным путем. Для этого преобразуют уравнение (5.30) таким образом, чтобы получить линейную зависимость между  $1/J$  и  $1/(P_1 - P_2)$ , которая используется для определения  $\phi$ , связывающего  $r_b$  с перепадом давления.

*Коэффициент массоотдачи  $\beta$*  можно оценить с помощью уравнений (5.13), (5.14) или (5.15) в зависимости от режима потока. При турбулентном потоке расчет по уравнению (5.13) хорошо согласуется с экспериментальными данными. При ламинарном потоке для макромолекулярных растворов расчетные значения по уравнениям (5.14) и (5.15) получаются меньше экспериментальных данных на 15–30%. В случае коллоидных взвесей в ламинарном потоке расчетные и экспериментальные значения практически не совпадают — расчетные потоки в 15 и более раз ниже, чем экспериментальные [30].

Для использования уравнений (5.13)–(5.15) необходимо знать вязкость и диффузионную способность растворов. Вязкость того или иного раствора может быть

легко определена лабораторно, однако диффузионную способность так определить затруднительно. Для макромолекулярных растворов приемлемый результат дает расчет по уравнению Стокса–Эйнштейна:

$$D = \frac{kT}{3\pi\eta d_p} \quad (5.32)$$

Коэффициент диффузии (5.32) уменьшается с увеличением размера частиц. Это выражается в ослаблении потока с увеличением размера частиц, что согласуется с экспериментальными данными для макромолекулярных растворов. В случае коллоидных взвесей наблюдается увеличение потока с ростом размеров частиц [33]. Это объясняется работой механизма (отличного от броуновской диффузии), ответственного в коллоидных взвешах за встречный перенос растворенного вещества.

В трубах в качестве механизма, отвечающего за встречный перенос вещества в пограничном слое (для коллоидных взвесей), был предложен «эффект вьюрка», благодаря которому частицы перемещаются от стен трубы по направлению к ее центру. Этот механизм предполагает увеличение потока с увеличением размера взвешенных частиц, что согласуется с экспериментальными данными. Это же наблюдается в случае диффузии под влиянием сдвига [33], предложенной для микрофильтрации, но о пригодности этой модели для ультрафильтрации данных нет.

Концентрация в намывном слое  $c_s$  для молекулярных растворов (например, белков и крахмалов) изменяется в диапазоне 0,2–0,4, тогда как для коллоидных взвесей ее значения больше. Данные по концентрациям в намывном слое наиболее часто встречающихся пищевых систем приведены в табл. 5.4.

Таблица 5.4. Параметры переноса для некоторых пищевых систем

	$C_s$ , % белка	Молекулярная масса	Коэффициент диффузии, $(10^{-12} \text{ м}^2/\text{с})$ / температура, °C
Обезжиренное молоко	20–25		
Цельное молоко	9–11		
Соевый экстракт	10		
Молочная сыворотка	20–30		
Желатин	20–30		
Яичный белок	40		
$\alpha$ -лактальбумин		16 000	74,0/20
$\beta$ -лактоглобулин		18 000	64,0/25
Казеин		24 000	14,0/25
Коллаген		345 000	11,6/20
Соевый белок 7 S		180 000	38,5/20
Соевый белок 11 S		350 000	29,1–33,0/20

## 5.3 Проектирование мембранных систем

При тангенциально-поточном фильтровании для удержания оставшихся растворенных веществ от наслоения на поверхность мембраны используется давление (для прохождения жидкости через мембрану) и скорость. Для разработчиков мембран основная задача — создание мембран, рассчитанных на большие объемы потоков и с большой задерживающей способностью, а для разработчиков отдельных модулей и систем главными параметрами являются давление и скорость. Поддержание высокой тангенциальной скорости для уменьшения толщины, а значит и сопротивления граничного слоя позволяет обеспечить экономические показатели потока пермеата, что дает приоритет разработчикам мембранных систем.

К трем наиболее типичным конфигуциям мембранных систем относятся «порционная» система, система «загрузка-выгрузка» и «однопроходная» системы. Всю область конфигураций мембранных систем, применяющихся в пищевой промышленности, образуют эти три типовые плюс некоторые специализированные разработки (например, конструкции для диафильтрации и параллельных потоков пермеата). В дискуссиях по поводу мембранных систем часто используют термины «концентрационное соотношение» и «регенерация».

В области применения мембранных систем используют такие термины, как концентрация, фракционирование, осветление и фильтрование. Эти понятия соответствуют предполагаемому использованию конечного продукта — пермеата, ретентата или того, и другого. Тем не менее с математической точки зрения эти термины могут трактоваться как концентрация растворенного вещества в некотором объеме потока, достигаемая путем удаления пермеата. Для измерения степени концентрации используются также термины «концентрационное отношение» и «объемное отношение».

Когда объем раствора  $V$  уменьшается на  $dV$  для увеличения его концентрации  $C$  на  $dC$  при помощи мембраны с задерживающей способностью  $\sigma$ , новая концентрация вычисляется по формуле:

$$C - dC = \frac{CV - C(1 - \sigma)dV}{V - dV} \quad (5.33)$$

После упрощений данное уравнение сводится к

$$\frac{dC}{C} = -\sigma \frac{dV}{V} \quad (5.34)$$

Это уравнение можно интегрировать, когда задерживающая способность  $\sigma$  является простой функцией концентрации. Когда задерживающая способность остается постоянной независимо от концентрации, получается уравнение (5.35), соотносящее объемное отношение с концентрационным.

$$\frac{C}{C_0} = \left( \frac{V_0}{V} \right)^\sigma \quad (5.35)$$

Уравнение (5.35) применимо к «порционным» системам концентрации, но путем замены объемов  $V$  и  $V_0$  на расходы  $Q$  и  $Q_0$  его можно применять и к непрерывным системам.

**Регенерация** — это объем пермеата, регенерированный из данного объема и выраженный в процентах. В непрерывных мембранных процессах регенерация выражается в терминах расхода пермеата и расхода напорного потока.

### 5.3.1 «Порционные» системы

«Порционные» системы — наиболее простые по конструкции и для достижения необходимой концентрации за данное время требуют наименьшей площади мембраны. Вместе с тем на предприятиях с непрерывным производственным циклом для них требуются буферные резервуары. Кроме того, у подобной конфигурации наблюдается наибольшее время удерживания.

В порционной системе с механизмом полной рециркуляции (рис. 5.9 а) для подачи и поддержания тангенциальной скорости используется лишь один нагнетательный насос. Такая конфигурация оптимальна для операций низкого давления, где рабочее давление находится в том же диапазоне величин, что и перепад давлений вдоль мембранного модуля (такое встречается в системах микрофльтрации).

Применительно к ультрафльтрации, где давление в системе значительно выше, чем его перепад вдоль модуля, для рециркуляции более экономично использовать отдельный насос. Такую порционную систему называют системой с частичной рециркуляцией (рис. 5.9 б).

Математическое описание «порционного» процесса включает два дифференциальных уравнения массообмена, приравнивающих расход жидкости и массу растворенного вещества к скоростям их проникновения через площадь мембраны.

$$\frac{dV}{dt} = -JA; \quad (5.37)$$

$$\frac{d(VC)}{dt} = -JC_p A. \quad (5.38)$$

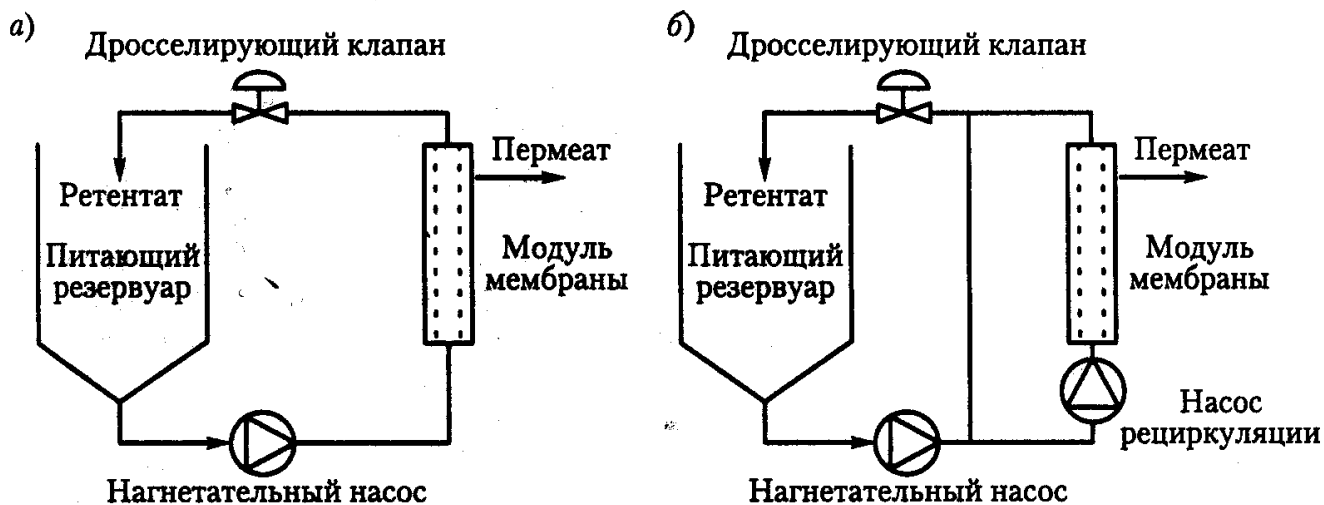


Рис. 5.9. «Порционные» мембранные системы: а) с полной рециркуляцией; б) с частичной рециркуляцией



В этих уравнениях  $J$  и  $C_p$  — функции от  $C$ . Эта функциональная зависимость для обратного осмоса задается уравнениями (5.3), (5.4), (5.8) и (5.9). Эту комбинированную систему уравнений для порционной концентрации при помощи обратного осмоса в явном виде решить невозможно — возможно лишь численное решение.

При микро- и ультрафильтрации, где утечкой растворенного вещества можно пренебречь, из этой системы выпадает уравнение (5.38). Функциональная зависимость  $J$  от  $C$  задается уравнением (5.22). Зависимость между  $V$  и  $C$  получают, задавая в уравнении (5.35)  $\sigma = 1$ . Эти уравнения можно подставить в уравнение (5.37), получая простую зависимость скорости изменения концентрации  $C$  от времени:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\beta A}{C_0 V_0} C^2 \ln \frac{C_B}{C}. \quad (5.39)$$

К сожалению, даже это на вид простое уравнение не имеет явного решения. Большая часть расхождений при проектировании мембранных систем вызваны именно этими математическими сложностями, и поэтому для проектирования «порционных» концентрационных систем и расчета рабочих параметров могут применяться простые численные методы.

### 5.3.2 Системы «загрузка–выгрузка»

В этой схеме напорный поток концентрируется в возвратном контуре, и его часть непрерывно просачивается через мембрану. «Свежий» напорный поток нагнетается в этот контур для выравнивания ретентата и скорости пермеации (рис. 5.10, а). Поскольку в данной системе питание и просачивание осуществляется непрерывно, такие системы являются непрерывными. Математическое описание работы подобной системы включает два уравнения массообмена, приравнивающих скорости проникновения через мембрану жидкости и растворенного вещества к разности скоростей подачи и просачивания. Уравнения (5.40) и (5.41) представляют собой балансы массообмена в одноступенчатой системе или на первой стадии системы многоступенчатой:

$$Q_1 = Q_0 = A_1 J_1; \quad (5.40)$$

$$Q_1 C_1 - Q_0 C_0 = A_1 J_1 C_{p1}. \quad (5.41)$$

При «загрузно–выгрузочной» конфигурации наивысшая концентрация на мембране обычно соответствует наименьшему расходу. Следовательно, мембрану делают с максимально возможной площадью поверхности. Время нахождения потока на мембране варьируется очень широко. При многоступенчатой конфигурации в виде нескольких последовательно подключенных контуров (рис. 5.10, б) площадь мембраны резко уменьшается. При трех или четырех контурах площадь поверхности мембраны приближается к «порционной» конфигурации.

В пищевой промышленности наиболее часто применяется многоконтурная система «загрузка–выгрузка» типовой конфигурации. Такая конструкция имеет то преимущество, что скорость тангенциального потока поддерживается независимо от других параметров системы, которые могут меняться в зависимости от времени или напора, однако это самая дорогая из всех возможных конфигураций.

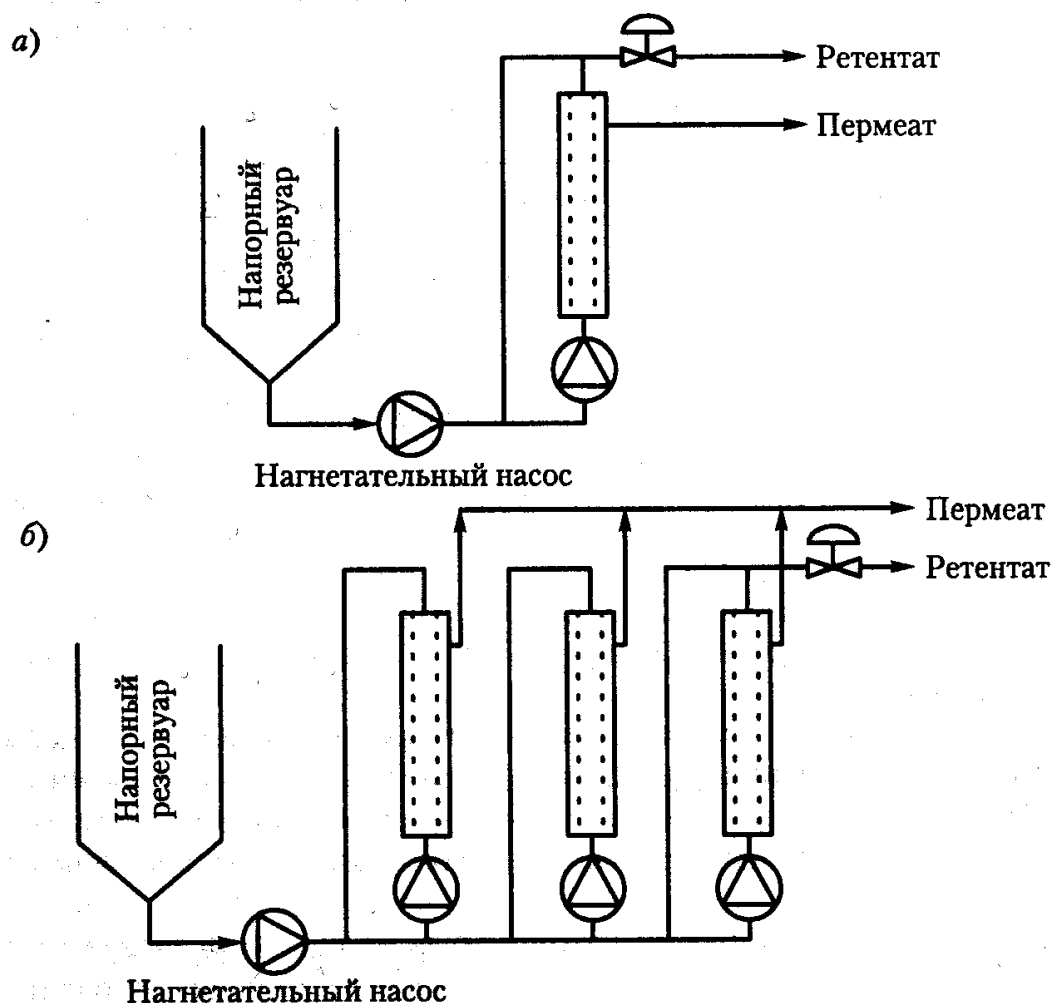


Рис 5.10. Системы «загрузка-выгрузка»: а) одноконтурная система, б) многоконтурная система

Перемещение ретентата из одного контура в другой в типовой конфигурации дает большее разнообразие времени его задержки по сравнению с одноконтурной системой. Для сокращения времени промывки системы между ее контурами встраивается клапан.

### 5.3.3 «Однопроходная» система

При «однопроходной» конструкции поток поступает с одного конца системы и выходит с другого, достигая желаемых концентраций или регенерации пермеата. Это наиболее экономичная система из всех мембранных систем благодаря небольшой площади мембраны, отсутствию рециркуляционных насосов и простоте технического решения. Математическое описание такой конфигурации сходно с описанием «порционной» конфигурации, где вместо времени в качестве независимой переменной используется продольная площадь мембранной системы в направлении движения потока:

$$\frac{dQ}{dA} = -J; \quad (5.42)$$

$$\frac{d(QC)}{dA} = -JC_p. \quad (5.43)$$

В этих уравнениях  $J$  и  $C_p$  — функции от  $C$ , а  $C$  — функция от  $Q$ . Взаимосвязь между  $Q$  и  $C$  отражена уравнением (5.35) с заменой расходов на скорости потока. Функциональная зависимость между  $J$  и  $C_p$  для обратного осмоса задана уравнениями (5.3), (5.4), (5.8) и (5.9). Эта система уравнений для концентрации при «однопроходной» системе на основе обратного осмоса также не имеет явного решения, и решение возможно лишь численное.

Функциональная зависимость  $J$  от  $C$  задана уравнением (5.22), взаимоотношение  $V$  и  $C$  получаем, подставив в уравнении (5.35)  $\sigma = 1$ . Подставив эти уравнения в уравнение (5.42), получим несложную формулу для изменения концентрации вдоль системы:

$$\frac{dC}{dA} = \frac{\beta}{C_0 Q_0} C^2 \ln \frac{C_B}{C}. \quad (5.44)$$

Следует отметить, что  $\beta$  — функция от скорости тангенциального потока, которая меняется по мере прохождения потока вдоль системы по мере уменьшения  $Q$  из-за пермеации. Это уравнение также не может быть решено в явном виде даже при постоянном  $\beta$ . Численное решение возможно с учетом изменения  $\beta$  в зависимости от  $Q$  и других параметров.

Регенерация пермеата при одном проходе через мембранный модуль зависит от отношения потока пермеата к тангенциальной скорости и на практике очень невелика. Следовательно, такое конструктивное решение ограничено ситуациями с низкой поляризацией концентрации, которая не требует высоких тангенциальных скоростей. Подобные системы часто используются для обратного осмоса загрязненной воды и производства воды с высокой степенью очистки.

В «однопроходных» системах обычно используются напорные резервуары с несколькими модулями на базе спиральных мембран. Скорость тангенциального потока уменьшается по мере прохода потока сквозь мембраны из-за уменьшения расхода вследствие пермеации. Это компенсируется посредством конфигураций конической

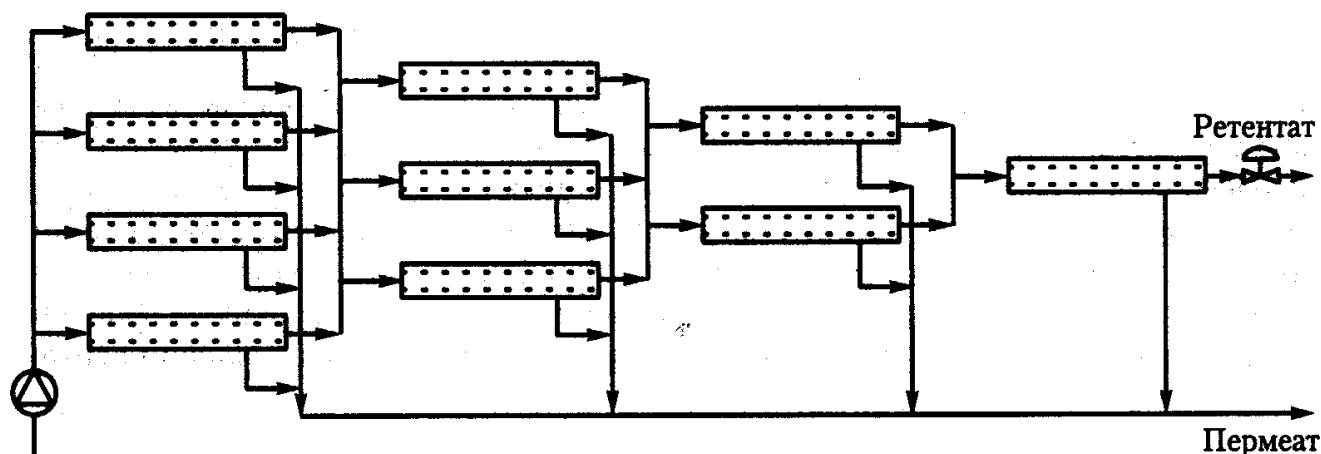


Рис. 5.11. «Однопроходная» система

или древовидной структуры, где последовательно сочленены различные стадии с постепенным сокращением числа параллельно подключенных напорных резервуаров (рис. 5.11). По мере прохождения ретентата по данной системе уменьшается напорное давление, что компенсируется встраиванием бустерных насосов.

Разработка «однопроходных» конических систем осуществляется с помощью компьютерных программ, предоставляемых ведущими фирмами-производителями мембранных систем. Эти программы основаны на численных методах, а примеры их применения приведены в работах [15] и [24].

«Однопроходная» конфигурация допускает параллельное подсоединение напорных резервуаров без добавления насосов в тех случаях, когда производство сокращается ниже заданного уровня. Это возможно потому, что уменьшение потока пермеата автоматически увеличивает тангенциальный поток, и это дает дополнительную гибкость при сокращении потока через мембрану с течением времени.

«Однопроходная» конструкция отличается наименьшим временем удерживания. В пищевой промышленности это является преимуществом, поскольку многие пищевые ингредиенты со временем портятся, а их микробиологическая загрязненность увеличивается. К сожалению, до настоящего времени это преимущество не в полной мере использовалось фирмами-изготовителями мембранных систем. Единственным известным в пищевой промышленности применением «однопроходных» систем является использование обратного осмоса выпарного конденсата при выработке воды для трубопроводов горячей воды (бойлеров).

### 5.3.4 Системы диафильтрации

Диафильтрация подразумевает дополнение к ретентату разжижителя и удаление его в качестве пермеата вместе с растворенным веществом. Ее целью может быть увеличение количества растворенного вещества или получение ретентата высокой степени чистоты. Диафильтрация может осуществляться в любом диапазоне фильтрования — от микрофильтрации до обратного осмоса. В режиме диафильтрации могут работать и «порционные», и непрерывные системы (рис. 5.12).

Диафильтрация может осуществляться последовательно путем многократного последовательного чередования концентрирования и разжижения. Кроме того, диафильтрация может быть и непрерывной путем добавления разжижителя для восполнения удаленного объема пермеата. При последовательной диафильтрации концентрация некоторого растворенного вещества в ретентате после  $n$  стадий задается уравнением (5.45) с помощью коэффициента уменьшения объема  $\rho$  и кажущегося удерживания растворенного вещества  $\sigma$ :

$$C = C_0 \rho^{n(\sigma-1)+1}. \quad (5.45)$$

При непрерывной диафильтрации концентрация растворенного вещества в ретентате после того, как начальный объем ретентата удаляется в качестве пермеата  $m$  раз, задается формулой

$$C = C_0 e^{-m(1-\sigma)}. \quad (5.46)$$

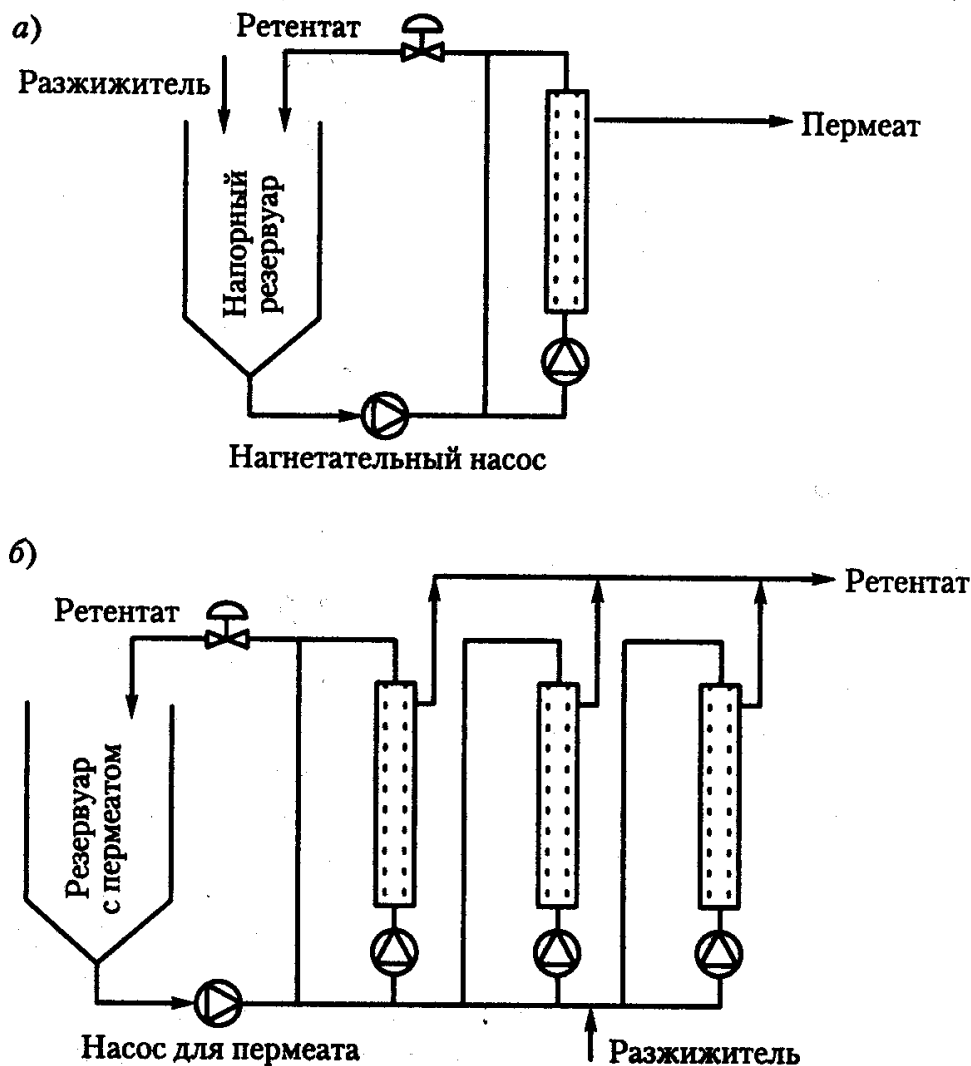


Рис. 5.12. Системы диафильтрации: а) одноконтурная система; б) многоконтурная система

Диафильтрация при низких концентрациях дает высокие расходы, но велик и подлежащий удалению объем. При высоких концентрациях расходы малы, но удаляемый объем также мал. Существует промежуточная оптимальная концентрация при непрерывной диафильтрации, позволяющая удалять заданный объем пермеата в кратчайшее время. Функциональная зависимость оптимальной концентрации растворенного вещества для процессов ультра- и микрофильтрации, контролируемая с помощью гелевого слоя от концентрации этого слоя [28] является в некотором роде уникальной и задается формулой

$$C_{opt} = \frac{C_c}{e}. \quad (5.47)$$

Оптимальная концентрация, являясь только функцией  $C_c$ , не зависит от других параметров (например, температуры и скорости), влияющих на поток пермеата в области, контролируемой гелевым слоем.

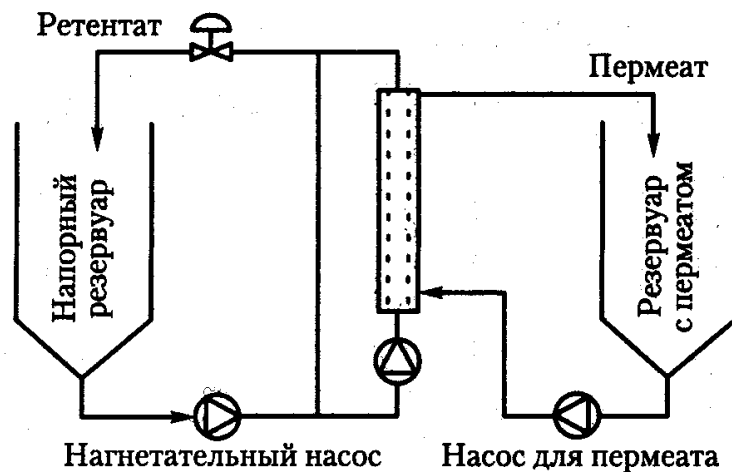


Рис 5.13. Система с параллельным потоком пермеата

### 5.3.5 Система с параллельными потоками пермеата

Для уменьшения толщины пограничного слоя при микрофильтрации зачастую требуется работа с высокими скоростями тангенциальных потоков, а для уменьшения толщины намывного слоя — работа при низких перепадах трансмембранного давления. Тем не менее при поддержании высоких скоростей тангенциального потока перепад давления вдоль мембраны достигает довольно высоких значений, намного превышающих оптимальный трансмембранный перепад. При этих условиях перепад трансмембранного давления высок на входе в модуль и низок на выходе из него. Это приводит к высокой загрязненности на входе и недостаточному использованию оконечной части.

Система с параллельными потоками пермеата [14] включает в себя напорный контур пермеата, параллельный напорному контуру ретентата, так что изменение давления пермеата близко изменению давления в контуре ретентата. Это приводит к фактически одинаковому перепаду давления по всей длине мембранного модуля (рис. 5.13).

На пищевых производствах, например при производстве молочных продуктов и безалкогольных напитков, керамические системы для микрофильтрации подобной конструкции дают потоки пермеата от 300 до 1000 л · м · ч. Эти потоки в несколько раз больше, чем для других конструктивных решений мембранных систем.

### 5.3.6 Испытание опытной установки

Главная цель конструирования мембранных систем состоит в том, чтобы оценить площадь поверхности мембран, необходимую для достижения нужной степени концентрации данного объема или расхода жидкости. На «входе» мы имеем изменение потока пермеата и степени удерживания в нем растворенного вещества по мере изменения концентрации с некоторой начальной до некоторой конечной величины. В настоящее время редко пытаются сразу же спрогнозировать взаимосвязь «поток–удерживание–концентрация» из-за незнания параметров и математических трудностей. Эти данные получают экспериментальным путем с использованием опытной установки.

Типовая опытная установка — это небольшая мембранная система, состоящая из напорных и рециркуляционных насосов, напорных резервуаров или мембранных систем, резервуаров для системы *CIP*, регулирующих давление клапанов, расходомер-

ров, манометров и термометров. Все компоненты устанавливаются на компактных шасси для облегчения их транспортировки.

Главная цель контрольных испытаний заключается в получении данных по потоку пермеата и удерживанию растворенного вещества как функции от его концентрации. Это достигается путем «порционных» экспериментов по концентрации, известных как «сканирование концентрации». Их результаты зависят от других рабочих параметров — например, давления, температуры и тангенциальной скорости. Такие зависимости могут изучаться путем сканирования давления, скорости и температуры.

В идеальном случае каждое из этих измерений складывается из данных по нескольким точкам, в которых изменяется только один параметр, а остальные остаются неизменными. Даже если каждое сканирование охватывает всего несколько точек, получение исчерпывающего «комплекта данных» становится чрезвычайно трудной задачей. Еще одной проблемой при проведении всеобъемлющего сканирования является необратимость явления загрязнения. При первом сканировании давления на мембране может образоваться намывной слой, который при возврате к нулевому давлению не исчезает (для этого необходима химическая очистка, требующая значительного времени).

Следовательно, было бы желательно сократить экспериментальную работу путем разумного применения параметрического отношения. В связи с этим практически никогда не проводится сканирование температуры, а вместо этого используются корректировки на основе изменения свойств. Так, в качестве стандартной корректировки при испытаниях обратного осмоса, например, используется 3%-ное увеличение потока на каждый градус Цельсия повышения температуры (что основано на взаимосвязи вязкости и температуры). Для определения пригодных рабочих параметров как минимум необходимо сканирование давления и скорости при начальных и конечных концентрациях.

### 5.3.7 Расчеты при конструировании опытного образца

При подобном конструировании даже наиболее простых мембранных систем в связи с вышеописанными математическими трудностями следует использовать численные методы. К счастью, эти методы могут быть реализованы на ПК с помощью электронных таблиц. Ниже в данном разделе мы рассмотрим пример использования численных методов для конструирования нескольких конфигураций мембранных систем.

На «входе» процедуры конструирования мы имеем изменение потока пермеата и степени удерживания растворенного вещества по мере изменения концентрации растворенного вещества от некоторой начальной до конечной величины при ожидаемых рабочих условиях.

Эти отношения получаются путем сканирования концентрации с помощью пробной шкалы. В данном примере используются параметры потока и удерживания, задаваемые уравнениями (5.48) и (5.49):

$$J = 28,3 \ln \frac{37}{c}; \quad (5.48)$$

$$\sigma = 0,43. \quad (5.49)$$

Для простоты удерживание принимается постоянным, равным 0,43. Эта величина выбирается так, чтобы пятикратное уменьшение объема соответствовало двукратному увеличению концентрации. Параметры уравнений (5.48) и (5.49) близки к экспериментальным результатам при ультрафильтрации обезжиренного молока [19] с помощью полого волоконного мембранного модуля из полисульфона с пропускной способностью до молекулярной массы 50 000.

Экспериментальная температура — 60 °С, а тангенциальная скорость — 1,11 м/с. Эти примеры определяют площадь мембраны, требующуюся для пятикратного концентрирования 5000 л обезжиренного молока с 10%-ным содержанием СВ за 1 ч работы с производительностью 1000 л продукта с 20%-ным содержанием СВ.

### 5.3.7.1 «Порционная» система

Диапазон концентраций от 10 до 20% СВ разделяется на более дробные участки. С помощью уравнения (5.37) при  $\sigma = 0,43$  рассчитывается объем для каждого значения концентрации. Площадь, необходимая для уменьшения объема в каждом дробном участке шкалы, рассчитывается путем деления уменьшения объема на средний поток за пределами данного деления. Подобная процедура с 10 дробными участками приведена в табл. 5.5.

### 5.3.7.2 Система «загрузка–выгрузка»

Водноступенчатой системе «загрузка–выгрузка» на мембрану всегда поступает жидкость с конечной концентрацией и наименьшим потоком. Требования к площади мембраны в этой системе могут быть легко определены путем расчета потока при конечной концентрации (с помощью уравнения 5.24) и делением общего объема пермеата на поток:

$$\begin{aligned} \text{поток пермеата при конечной концентрации} &= 28,3 \ln(37/20) = 17,4 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}) \\ \text{общий объем пермеата} &= 5000 - 1000 = 4,000 \text{ л/ч} \\ \text{площадь мембраны} &= 4000/17,4 = 229,8 \text{ м}^2 \end{aligned}$$

Таблица 5.5. Конструирование «порционной» системы

с, %	J, л · м · ч	V, л	Площадь, м <sup>2</sup>
10	37,0	5000	
11	34,3	4007	27,8
12	31,9	3274	22,1
13	29,6	2719	18,1
14	27,5	2289	15,1
15	25,6	1950	12,8
16	23,7	1679	11,0
17	22,0	1458	9,6
18	20,4	1277	8,6
19	18,9	1126	7,7
20	17,4	1000	7,0
Общая площадь			139,7



### 5.3.7.3 Непрерывная система

В непрерывной или многоконтурной системе «загрузка–выгрузка» у мембраны могут быть различные площади, однако при этом появляется слишком много степеней свободы, в связи с чем единственного конструктивного решения быть не может. С точки зрения удобства конструкции и эксплуатации наиболее практичными являются системы, где все контуры имеют одну и ту же площадь мембраны.

Независимо от количества контуров последний из них работает при конечной концентрации. Следовательно, численный расчет при конструировании такой системы начинается с последнего контура, и система уравнений для него состоит из:

$$Q_{n-1} = Q_n + \beta A \ln \frac{C_c}{C_n}; \quad (5.50)$$

$$\frac{C_n}{C_{n-1}} = \left[ \frac{Q_{n-1}}{Q_n} \right]^\sigma. \quad (5.51)$$

Выбирается начальное значение для  $A$ , и уравнение (5.50) решается для  $Q_{n-1}$ . Эта величина используется затем в уравнении (5.51), которое решается для  $C_{n-1}$ . Подобная процедура последовательно повторяется для каждого предыдущего контура вплоть до первого для  $Q_0$  и  $C_0$ . Величина  $A$  корректируется до тех пор, пока  $Q_0$  и  $C_0$  не станут равны требуемому значению. Результаты подобного решения для трех- и пятиконтурной системы приведены в табл. 5.6.

Площадь мембраны на один контур, дающий эти величины, составила 53,5 и 30,3 м<sup>2</sup> для трех- и пятиконтурной системы соответственно. Следовательно, общая площадь мембраны для трех- и пятиконтурных систем составляет соответственно 160,5 и 151,5 м<sup>2</sup>. Эти величины находятся в диапазоне между параметрами, необходимыми для «порционных» и «однопроходных» систем. Площади для всех конструкций суммированы ниже:

«порционная» система	= 139,7 м <sup>2</sup>
пятиконтурная система с рециркуляцией	= 151,5 м <sup>2</sup>
трехконтурная система с рециркуляцией	= 160,5 м <sup>2</sup>
одноконтурная система типа «загрузка–выгрузка»	= 229,8 м <sup>2</sup>

## 5.3.8 Мембранные системы очистки

В молочной промышленности требуется, чтобы мембранные системы удовлетворяли санитарным стандартам США [10] (стандарт 3-А). Все трубопроводы, резервуары, клапаны и т. д. должны быть изготовлены из нержавеющей стали марки 316 с качеством обработки поверхности вальцами не менее № 4. Для контроля давления и температуры применяются преобразователи диафрагменного типа. В трубопроводах следует избегать «мертвых» (застойных) зон. Материалы для прокладок, мембран и других модульных компонентов должны соответствовать федеральным нормативным актам [11].

Таблица 5.6. Конструирование многоконтурной системы

Трехконтурная система			Пятиконтурная система		
Контур	Q, л/ч	C, %	Контур	Q, л/ч	C, %
3	1000	20,0	5	1000	20,0
2	1931	15,1	4	1527	16,7
1	3292	12,0	3	2210	14,2
0	5000	10,0	2	3029	12,4
			1	3965	11,1
			0	5000	10,0

Специально для молочной промышленности был разработан спиральный мембранный модуль с файберглассовой оболочкой, удаляющий следы моющего средства. Для подгонки модуля относительно внутреннего диаметра напорной емкости вокруг него располагают один или два слоя распорок питателя. Для предотвращения утечки химических веществ при эксплуатации в мембранных системах очистки предусмотрено применение адгезивов и иных пластмассовых компонентов.

## 5.4 Работа мембранных систем

Работа мембранных систем подразумевает поддержание потока пермеата и задержание растворенного вещества в заданных пределах, определяемых требованиями к данному продукту и технологии. Поток пермеата в ходе обработки некоторого раствора намного слабее, чем поток чистой воды. Причинами уменьшения потока являются: гидравлические характеристики раствора, различные формы взаимодействия в мембране, концентрационная поляризация и загрязнения мембраны. Основа правильной работы мембранных систем — понимание вышеуказанных механизмов и управление ими.

### 5.4.1 Явления загрязнения

Основная проблема при проведении мембранных процессов — это ослабление потока с течением времени (в основном из-за загрязнения). Строго говоря, загрязнение выражается в постепенном уменьшении потока, при этом остальные рабочие параметры — давление, температура, концентрация, скорость и т. п. — остаются неизменными [18].

Легче всего выявляется загрязнение мембранных модулей. При работе со взвесьями используются модули из полых волокон, и крупные частицы могут заблокировать вход в эти волокна. В спиральных мембранных модулях частицы помимо блокировки входов попадают в ячейки сетки питателя. Подобные явления сопровождаются уменьшением потока, а также увеличением перепадов давления вдоль модуля, что можно легко обнаружить.

За первые несколько секунд с начала запуска мембраны на ее поверхности образуется концентрированный поляризованный слой (это неизбежное, но обратимое явление). Уменьшение потока вследствие концентрационной поляризации может быть снижено путем уменьшения давления, увеличения скорости или снижения концентрации, и поэтому такое явление не считается загрязнением.

Второй вид загрязнения, встречающийся на поверхности мембраны, — это следствие концентрационной поляризации. Растворенные вещества, накапливающиеся на поверхности мембраны, подвергаются со временем необратимым изменениям и формируют на поверхности мембраны намывные слои. Механизм образования намывного слоя регулируется взаимодействиями «поверхность—химические явления», «мембрана—растворенное вещество» и «растворенное вещество—растворенное вещество». Типичными веществами, загрязняющими поверхность при ультрафильтрации, являются такие макромолекулы, как белки, пектины и крахмалы. При обратном осмосе основными загрязнителями поверхности мембраны являются неорганические вещества — например, сульфат кальция, фосфат кальция и углекислый кальций.

Третий вид загрязнения — это засорение проходных отверстий. Достаточно мелкие растворенные вещества проникают в поры мембраны и оседают на определенных участках (изгибах и сужениях). Особенно подвержены подобному виду загрязнения извилистые проходные отверстия микропористых микрофильтрационных мембран. В проходных отверстиях капиллярных мембран подобное засорение обычно не наблюдается, поскольку диаметр их поперечного сечения одинаков. Асимметричные мембраны менее устойчивы к подобного рода засорениям из-за изменяющегося профиля проходных отверстий.

Четвертый вид загрязнения — это адсорбция растворенного вещества, способствующая уменьшению размеров проходных отверстий. Даже небольшое уменьшение их диаметра значительно сокращает поток, поскольку последний пропорционален четвертой степени диаметра (см. уравнение 5.24). Считается, что основным признаком загрязнений при ультрафильтрации является адсорбция белков на стенках проходных отверстий. Керамическая микрофильтрация водных растворов сахаров показала, что взаимодействие «мембрана—сахар» вызывает уменьшение пропускной способности [29].

## 5.4.2 Предварительная обработка

Засорение фидерных каналов ингредиентами взвесей должно регулироваться путем физического его устранения в ходе предварительной обработки. Это особенно важно для спиральных мембранных модулей, наиболее подверженных этому виду засорения. Взвешенные вещества, оседающие примерно за 1 ч, и частицы крупнее одной десятой диаметра фидерного канала для подобных модулей считаются вредными. Спиральные мембранные модули производятся с различным стандартом проходных отверстий. Типовая ширина проходных отверстий — 24, 30, 45 и 80 мил. Следовательно, частицы более 3 мил (или 75 мкм) должны быть удалены, а наиболее часто применяемой шириной проходного отверстия является 30 мил.

При предварительной обработке наиболее часто применяется предварительная фильтрация фильтрами грубой очистки. Проволочные клиновидные фильтры, виб-

росита, вращающиеся сита, параболические напорные экраны — все это примеры некоторых фильтров грубой очистки. Для разделения мелких створоженных частиц, остающихся в сыворотке перед ультрафильтрацией, применяется также центрифугирование.

Волоконные и трубчатые модули по сравнению со спиральными требуют менее строгого экранирования, однако модули из тонкого волокна требуют более тонкой предварительной очистки. Фруктовый сок, концентрируемый с использованием тонких волоконных модулей, требует предварительной очистки с помощью ультрафильтрации.

Предварительная обработка напорного потока химическими способами необходима для удаления химически активных загрязнителей. При обратном осмосе корректировка pH путем добавления кислот используется для предотвращения карбонатной накипи, тогда как кислые соли — для предотвращения сульфатной накипи. При обратном осмосе вызывают коагуляцию в коллоидных взвешях, применяя полиэлектролиты. При использовании тонкопленочных композитных мембран с низкой сопротивляемостью хлору применяется дехлорирование (посредством добавления бисульфита натрия или обработки активированным углем).

Пектин — основной загрязнитель при осветлении и концентрировании фруктовых соков. Удаление пектина при помощи ферментов уменьшает загрязнение мембраны и увеличивает выход сока. На производствах, где используются гидроколлоиды (желатинизированный крахмал и желатин), загрязнение ими можно уменьшить повышением температуры, что также увеличивает поток пермеата вследствие уменьшения вязкости.

### 5.4.3 Очистка мембран

Резко сократить загрязнение можно путем модернизации мембран, мембранных модулей и систем, технологии и предварительной очистки, однако длительная работа мембран неизбежно требует применения тех или иных форм очистки, которая проводится механическими, гидравлическими и химическими методами.

Механическая очистка трубных систем большого диаметра осуществляется проталкиванием сквозь трубы губок сферической формы, диаметр которых больше диаметра трубы. Гидравлическая очистка может проводиться разными способами. В трубных и монолитных мембранных системах используется периодическая промывка обратным потоком и пульсация обратным потоком пермеата. Такие методы не применимы при использовании тонких пленочных мембран из-за возможности отслоения пленки. Изменение направления потока на обратное (реверсирование) применяется для очистки мембран из полых волокон, где загрязнения скапливаются преимущественно на выходе. Повышение давления потока пермеата применяется в системах микрофильтрации скорее как технологический прием, а не как способ очистки.

Химическая очистка — наиболее важный метод очистки мембран, разработанный в рамках узкоспециализированного рынка моющих средств. Кислоты (азотная, фосфорная, лимонная) используются для удаления неорганических загрязнений (например, фосфата кальция в молочной промышленности и углекислого кальция при

обессоливании). При органических загрязнениях наиболее эффективна щелочная мойка. Очистка от белков и жиров (основных источников загрязнений в молочной промышленности) осуществляется с помощью щелочей или хлора.

Химическая очистка мембран, работающих на принципе обратного осмоса, требует особого внимания к проблемам химической стойкости мембран. Композитные мембраны обладают ограниченной стойкостью к хлору, но более стойки к изменению рН, в связи с чем их можно промывать относительно сильными кислотами и щелочами. Асимметричные мембраны из ацетата целлюлозы обладают лучшей стойкостью к хлору, но хуже переносят повышенную кислотность. Большинство материалов, используемых при микро- и ультрафильтрации, отличаются как высокой стойкостью к хлору, так и к изменению рН.

#### **5.4.4 Управление мембранной системой**

Цель управления мембранной системой в том, чтобы поддерживать требуемые расходы и качество технологического потока в зависимости от изменений потока на входе и в технологической системе. Главная проблема, с которой должна справляться система управления, — уменьшение потока со временем из-за загрязнения. Основным параметром, подлежащим управлению в мембранной системе — это давление.

Система управления подстраивает давление под изменения потока пермеата из-за загрязнения или изменения концентрации на входе. Давление регулируется пневматическим обратным клапаном давления. Качество выходного потока контролируется путем поддержания заданного соотношения между расходами на выходе и входе. В случае применения насосов с регулируемым числом оборотов для поддержания данного соотношения используется регулировка двигателя насоса. В случае же применения многоконтурных центробежных насосов для контроля расхода используется контрольный клапан на выходе насоса.

Обычно в пищевой промышленности мембранная система начинает работать утром при низком давлении. В течение дня давление постепенно повышается для поддержания необходимой производительности линии, а поток постепенно уменьшается из-за загрязнения. В молочной промышленности при суточной работе системы в течение примерно 20 ч требуется ее очистка в течение 4 ч. Такая схема соответствует нормам обязательной мойки иного заводского оборудования. При производстве фруктовых соков обычно применяется мойка оборудования два раза в день. Некоторые мембранные системы предусматривают возможность размещения резервного набора мембран.

### **5.5 Применение мембран в пищевой промышленности**

Мембраны обеспечили быстрый прогресс в пищевой промышленности после их появления в начале 1960-х гг. Область применения мембран охватывает полный спектр проблем — от микрофильтрации до обратного осмоса. Их применяют в различных подотраслях пищевой промышленности — в молочной, плодоовощной, зернообра-

Таблица 5.7. Применение мембран в пищевой промышленности

Подотрасль	Область применения	Принцип	Модуль	Мембрана
Молочная	Концентрирование молока	ОО	Спираль	CA, TFC
	Концентрирование сыворотки	ОО	Спираль	CA, TFC
	Фракционирование сыворотки	УФ	Спираль	PS, PVDF, PES
	Концентрирование лактозы	ОО	Спираль	CA, TFC
	Пастеризация молока	МФ	Трубчатый	Керамическая
	Обессоливание	НФ	Спираль	TFC
Производство соков	Осветление	МФ	Трубчатый	Керамическая
		МФ	Из полых волокон	PS, PE
		УФ	НФ	PS
		МФ/УФ	Трубчатый	PVDF, PS
	Концентрирование	ОО/НФ	Спираль	TFC
		ОО/НФ	Трубчатый	TFC
		ОО/НФ	HFF	TFC
		МФ	Трубчатый	Керамическая
	Регенерация щелочи	УФ	Спираль	PS
	Концентрирование	УФ	Спираль	PS
Производство желатина				
Производство растительных подсластителей	Осветление декстрозных сахаров	МФ	Спираль	PS/PES
Сахарная	Осветление	МФ/УФ	Трубчатый	Керамическая
	Предварительное концентрирование	ОО	Спираль	TFC

Примечание: ОО — обратный осмос; УФ — ультрафильтрация; МФ — микрофильтрация; НФ — нанофильтрация; СА — ацетат целлюлозы; TFC — тонкий пленочный композит; PS — полисульфон; PVDF — поливинилидендифторид; PES — полиэфирсульфон; PE — полиэфир.

батывающей, сахарной и т. п. Важнейшие области применения мембран в пищевой промышленности приведены в табл. 5.7.

### 5.5.1 Молочная промышленность

Концентрирование молока методом обратного осмоса (еще до выпаривания) и производство сыра доказали возможность применения для этих целей мембран. Степень концентрирования из-за осаждения фосфата кальция увеличивается примерно в три-четыре раза. Мембранные системы в случае их использования менее капиталоемки, более экономичны и отличаются меньшим энергопотреблением при эксплуатации по сравнению с другими технологиями [20]. Применяются спиральные модули из ацетата целлюлозы и тонкие пленочные мембраны.

При производстве сыра около 85% молока остается в виде сыворотки, содержащей белки сыворотки, лактозу и растворы солей. Концентрирование сыворотки методом обратного осмоса и ее фракционирование с помощью ультрафильтрации в настоящее время стали крупнейшей областью применения мембран в пищевой промышленности. Концентрация сыворотки сокращает транспортные издержки, а ее фракционирование дает концентрат сывороточных белков, являющийся ценнейшим побочным продуктом.

Микрофильтрация молока при помощи монолитных керамических систем получила распространение после внедрения конструкции с параллельными потоками пермеата. Общеизвестно, что такая технология позволяет получить более стабильные пастеризованные и охлажденные молочные продукты.

Нанофильтрация и электродиализ используются в качестве альтернативных вариантов ионного обмена при обессоливании сыворотки. Большой интерес вызывает также применение мембранных технологий при производстве молочных продуктов с низким содержанием натрия и лактозы.

## 5.5.2 Производство фруктовых и овощных соков

Производство фруктовых соков нормальной концентрации предусматривает удаление взвешенных и коллоидных частиц при помощи фильтрования. Традиционно оно осуществляется с помощью ротационных вакуумных и пластинчатых фильтров с использованием различных «клеев» для осветления, а также вспомогательных средств. Ультрафильтрация имеет преимущества перед другими видами фильтрования благодаря повышенному выходу и улучшению качества продукта, а также снижению издержек на удаление отходов.

Фруктовые соки концентрируют из исходного сырья с 10–16%-ным содержанием сахара до пригодного для длительного хранения и транспортировки продукта с примерно 60%-ным его содержанием. Концентрирование соков обычно производится в многоцелевых выпаривателях, однако по сравнению с ними у обратного осмоса ниже издержки и энергопотребление. Тем не менее эти преимущества ограничиваются диапазоном относительно низких концентраций — обычно около 24%. Еще одно преимущество обратного осмоса — получение концентрата более высокого качества вследствие отсутствия термического повреждения. Более высокие концентрации (до 60%) достигаются в специально сконструированных многоконтурных системах, которые, однако, не очень экономически эффективны. Концентрирование неочищенных и неосветленных соков производится с помощью трубчатых мембранных модулей, а очищенные осветленные соки концентрируются в спиральных мембранных системах.

Томатный сок концентрируют от начальных 5% СВ до примерно 30% СВ при помощи выпаривания. Высокое содержание сухих веществ и неньютоновский характер жидкости предъявляет высокие требования к разработчикам мембранных систем. Для производства томатных соков с 8%-ным содержанием СВ, используемых для приготовления соусов, применяются трубчатые мембранные модули [27].

## 5.5.3 Производство сахара

Технология производства тростникового и свекольного сахара включает осветление сока для удаления взвешенных и коллоидных частиц, для чего используются ультра-

фильтрация. Обратный осмос успешно применяется для тонкой очистки концентрированного сока. В США для предварительного концентрирования кленового сиропа ранее других методов начали применять обратный осмос.

#### 5.5.4 Подсластители из кукурузы

Подсластители из кукурузы производятся из кукурузного крахмала с помощью гидролиза кислот или ферментов. Этот процесс включает несколько операций по осветлению, фракционированию и концентрированию. Для осветления декстрозы ранее применялись диатомитовые фильтры, которые в последнее время заменяются спиральными системами микрофильтрации. Сепарирование олигоглюкозы производится с помощью спиральных мембран для нанофильтрации. Предварительное концентрирование фруктозы может осуществляться с использованием обратного осмоса. В этой подотрасли в настоящее время используется от 2 до 3 млн квадратных футов мембран [26].

#### 5.5.5 Виноделие и пивоварение

В настоящее время в виноделии при осветлении диатомитовые и рамные фильтры заменяются трубчатыми и волоконными микрофильтрационными мембранами. Ультрафильтрация доказала свою эффективность при замене «оклеивания». Концентрирование вин при помощи обратного осмоса ускоряет процесс осаждения тартрата при холодной стабилизации. Обратный осмос используется в производстве вин с пониженным содержанием алкоголя.

Микрофильтрация посредством керамических мембран применяется при холодной стерилизации пива, а обратный осмос — при производстве слабоалкогольного пива. В мембранах обратного осмоса пары пива конденсируются и используются для уменьшения загрязнения воздуха и регенерации энергии.

#### 5.5.6 Производство продуктов животного происхождения

На скотобойнях в отходы идет кровь, причем в больших объемах. Из нее с помощью мембранной сепарации и очистки можно получать побочные продукты, для чего используется ультрафильтрация клеток крови, концентрирование плазмы посредством ультрафильтрации и концентрирование гомогенизированной крови с применением трубчатых, спиральных и пластинчатых модулей.

Одним из таких побочных продуктов является желатин, в котором содержатся коллоидные белки, получаемые гидролизом коллагена. Для получения желатина в порошке гидролизат с 3–15%-ным содержанием СВ концентрируют и высушивают. Традиционно его получали выпариванием и сушкой в барабанной сушилке. Оказалось, что ультрафильтрация по сравнению с выпариванием экономически выгоднее и наносит меньше термических повреждений. Кроме того, ультрафильтрация обеспечивает обессоливание, что позволяет получать дополнительный продукт. При осветлении желатина диатомитовые фильтры заменяются трубными системами микрофильтрации.



### 5.5.7 Переработка стоков

На пищевых предприятиях существует проблема большого количества стоков с находящимися в них взвешенными и растворенными веществами. Возрастающие расходы на переработку стоков (особенно в городах) вынуждают предприятия обращать особое внимание на внедрение передовых технологий по их переработке. При работе со стоками, содержащими органические вещества или соли, оказывается целесообразным применение обратного осмоса. Предприятия, имеющие дело с рассолами и маринадами, для их осветления (в целях повторного использования) применяют микрофильтрацию, а обратный осмос — для концентрирования стоков рассола с возможностью их дополнительного использования.

## 5.6 Экономические аспекты

Экономические аспекты применения мембран включает оценку издержек по применению конкретной технологии с учетом ее преимуществ по сравнению с конкурентоспособной технологией или другими альтернативами. В стоимость мембранной технологии включают амортизацию основных фондов, затраты на замену мембран, стоимость энергии, моющих средств и рабочей силы. К преимуществам применения той или иной технологии относят сокращение эксплуатационных затрат относительно конкурентоспособных технологий, возможность получения побочных продуктов, экономию продукта, воды, энергии, химикатов и т. п. Очень важно применение берегающих технологий, снижающих издержки при переработке стоков.

### 5.6.1 Стоимость мембран и мембранных систем

Стоимость мембран зависит от их типа, а стоимость мембранных систем — от типа, размера и степени автоматизации. Сравнение стоимости шести наиболее общих типов систем мембран, применяемых в пищевой промышленности, дано в табл. 5.8 (по данным фирм-изготовителей на 1996 г.).

Спиральные мембраны и системы на базе 4-х встроенных модулей с размером проходных отверстий 30 мил применяются для концентрирования сыворотки с 6 до 12% СВ при помощи обратного осмоса и для производства 35%-ного концентрата сывороточных белков с помощью ультрафильтрации. Более крупные проходные отверстия дают меньшую площадь фильтра на каждый модуль и, следовательно, большие издержки. Модули большего диаметра стоят дешевле, а меньшего — дороже. Стоимость системы из полого волокна рассчитана на основе 5 встроенных модулей из полисульфоновых волокон диаметром в 1,1 мм. Волокна большего диаметра обычно существенно увеличивают стоимость. Стоимость трубных систем базируется на стоимости труб диаметром 12,7, а керамических — на стоимости труб диаметром 4 мм.

В процессе принятия решения нельзя руководствоваться лишь данными о стоимости той или иной мембранной системы. У различных систем проницаемость при

Таблица. 5.8. Стоимость мембран и мембранных систем

	Спиральная полимерная, ОО	Спиральная полимерная, УФ	Из полового волокна, полимерная, ОО	Трубчатая с внешним управлением, полимерная, УФ	Трубчатая с авторегулировкой, полимерная, УФ	Трубчатая монокристаллическая, МФ
<i>Основные параметры системы</i>						
Площадь, м <sup>2</sup>	600	600	147	520	250	237
Мощность, кВт	125	45	40	120	80	67
<i>Стоимость базовой системы</i>						
Мембраны, \$	32 000	32 000	36 000	100 000	60 000	75 000
Мембранной системы, \$	196 000	162 000	110 000	750 000	350 000	300 000
<i>Стоимость и производительность</i>						
Электроэнергия, Вт/м <sup>2</sup>	212	77	272	230	320	1800
Мембранные модули, \$/м <sup>2</sup>	55	55	245	192	240	2050
Мембранные системы, \$/м <sup>2</sup>	334	276	750	1440	1400	8100

одинаковом потоке существенно различается. Спиральные системы, имеющие низкую стоимость, отличаются небольшими допусками по взвешенным частицам, и поэтому требуют тщательной и довольно дорогой предварительной подготовки. Фильтры на основе полых волокон и трубные мембранные системы более приспособлены к работе со взвешенными частицами. Полимерные системы по сравнению с керамическими менее химически устойчивы. Все эти факторы следует учитывать при оценке стоимости тех или иных мембранных систем.

По своей природе мембранные системы модульные, и поэтому с увеличением типоразмера стоимость их возрастает практически линейно. Для обессоливания морской воды и рассолов типоразмерный коэффициент систем составляет 0,85–0,95 [31].

## 5.6.2 Энергетические издержки

Тангенциально-поточное фильтрование осуществляется под действием электронасосов. При применении высокого давления, например, при обратном осмосе морской воды, нагнетающий насос — основной энергопотребитель. При применении низкого давления, например, при ультра- и микрофильтрации, рециркуляционные насосы потребляют больше энергии, чем нагнетающие.

Мембранное фильтрование является одним из наиболее энергетически эффективных средств выделения из воды растворенных веществ (например, соли и сахара). Требования к минимальному энергопотреблению при обессоливании соленой

воды являются функцией от концентрации соли, регенерации и температуры, которая возрастает с ростом каждого параметра [21]. Минимальное энергопотребление для обессоливания морской воды с 3,5%-ным содержанием соли при 50%-ной регенерации и 25 °С составляет около 1,04 кВт · ч/м<sup>3</sup>. Энергопотребление у систем обессоливания морской воды находится в диапазоне от 4 до 10 кВт · ч/м<sup>3</sup>, в то время как для солоноватой воды и систем смягчения воды энергопотребление составляет около 0,5–2 кВт · ч/м<sup>3</sup>.

Энергопотребление в оптимально сконструированных системах ультрафильтрации — около 50 Вт/м<sup>2</sup> площади мембраны [23]. При общей эффективности в 50% и среднем потоке пермеата в 20 л/(м · ч) энергопотребление в оптимально сконструированной системе составляет около 5 кВт · ч/м<sup>3</sup>.

### 5.6.3 Прочие затраты

К прочим затратам относят затраты на замену мембран, на моющие средства и на оплату труда. Затраты на замену мембран обратно пропорциональны сроку их эксплуатации. В молочной промышленности, где ежедневно применяются сильные моющие средства, срок эксплуатации мембран составляет около 12–18 мес. Мембраны для ультрафильтрации на основе полых волокон используются при осветлении уксуса около 4 лет. Наиболее «долгоживущими» являются керамические мембраны — их срок службы составляет более 8 лет.

Затраты на мойку и очистку сильно варьируют и зависят от степени загрязнения. Сообщается [13], что при ферментации закваски с нагрузкой на линию 4000 ч/год затраты на специальную очистку составляют \$0,10/м<sup>2</sup>. Очистка мембран более эффективна при высоких температурах. При необходимости для нагрева воды могут использоваться пар, газ или электричество. При сравнительно небольших технологических затратах основная часть затрат приходится на капитальные затраты по прокладке трубопроводов для газа и пара. В общем, затраты на мойку и очистку составляют от 10 до 20% от общих эксплуатационных расходов. Мембранные системы не требуют внимания операторов целый день, а требуется оно лишь при включении и очистке. Общие трудозатраты составляют около 2 ч в день.

### 5.6.4 Экономическая оценка концентрирования сывороточного белка

Применение мембран в пищевой промышленности лучше всего обосновано для концентрирования сывороточных белков. Имевшие место на ранних этапах трудности с производительностью, стабильностью потока, очисткой и долговечностью мембран были со временем преодолены, что позволило сделать мембранные технологии стандартными технологическими операциями на предприятиях по производству сыра. Этому также способствовало устойчивое снижение стоимости мембранных модулей для молочной промышленности.

Примерная экономическая оценка (табл. 5.9) основана на информации ведущего производителя мембранных систем [16]. В данной системе концентрирования белка сыворотки используется четырехдюймовые очистные спиральные полисульфоновые

Таблица 5.9. Экономическая оценка концентрирования белка сыворотки

<b>Параметры системы</b>	
Объем подачи сыворотки, л/день	456 000
Концентрат белка сыворотки, л/день	81 500
Концентрат белка сыворотки, кг сухой массы/день	8 500
Объем пермеата, л/день	374 500
Расход пермеата, л/(м · ч)	19,5
Рабочее время в день, ч	20
Количество рабочих дней в году	312
Площадь мембраны, м <sup>2</sup>	1000
Капитальные затраты, \$	300 000
Электроэнергия, кВт	60
<b>Затраты, \$/год</b>	
Амортизация, \$300,000 @ 0,149	44 700
Стоимость электроэнергии, 374 400 кВт @ \$0,075	28100
Замена мембран, \$75,000 на 18 мес	50 000
Мойка и очистка, общая сумма	24 000
Стоимость рабочей силы, общая сумма	12 000
Общие затраты	158 800

мембранные модули. Базой для оценки послужила трехконтурная система с 10 резервуарами и 5 модулями в каждом контуре, что дает в сумме 150 модулей с общей площадью мембран 1000 м<sup>2</sup>.

Данная установка обрабатывает около 460 000 л/день сыворотки с содержанием СВ 6,2% и производит 81 500 л 35%-ного белкового концентрата с содержанием СВ 10,4%, чем концентрирование повышается в 5,6 раза.

Установка для переработки сыворотки помимо системы ультрафильтрации требует наличия агрегата для осветления (для отделения твердых веществ), теплообменника для пастеризации и охлаждения, резервуаров для хранения, трубопроводов и т. п. Также может потребоваться увеличение потребления электричества, пара, воды и хладагента, в связи с чем капитальные и эксплуатационные затраты на них должны включаться в общую экономическую оценку. Альтернативой переработке сыворотки может являться возврат ее на животноводческие фермы в качестве кормовой добавки или слив в сточные воды, что явно менее выгодно.

### 5.6.5 Экономическая оценка осветления сока

Осветление сока включает отделение взвешенных и коллоидных частиц, образующих муть. Отделение крупных частиц осуществляется с помощью центрифугирования, но с уменьшением размера частиц и изменением плотности этот процесс становится все более дорогим. Эти факторы не так существенны при фильтровании. В технологии тонкой очистки преобладают ротационные вакуумные фильтры с наполнителем и пластинчатые фильтры, однако в большинстве случаев мембранное фильтрование более предпочтительно, чем фильтрование с помощью фильтров с наполнителем.

Стоимостная оценка ультрафильтрации и фильтрования с помощью фильтров с наполнителем при осветлении закваски для ферментации основана на данных [13] и

приведена в табл. 5.10, где дается сравнение системы ультрафильтрации на основе полых волокон с барабанным фильтром с наполнителем. Данная таблица показывает, что даже если капитальные затраты на систему ультрафильтрации в четыре раза выше затрат на фильтрование с наполнителем, общие эксплуатационные затраты на нее на 35% ниже. У фильтров с наполнителем превалируют затраты на вспомогательные материалы и расходы на удаление отработанных материалов. Возможность увеличения регенерации при помощи ультрафильтрации (примерно на 2%) [13] свидетельствуют о преимуществах ультрафильтрации по сравнению с фильтрами с наполнителем.

### 5.6.6 Экономическая оценка концентрирования сока

Мембранные системы при концентрировании сока должны быть конкурентоспособны с системами выпаривания. Экономичность выпаривания зависит от типа испарителя и стоимости энергии. Опытное сравнение систем на основе испарителей и обратного осмоса для предварительного концентрирования томатного сока с 4,5 до

Таблица 5.10. Сравнение осветления при помощи мембранных технологий и систем с наполнителем

	Ультрафильтрация	Фильтрование с помощью фильтров с наполнителем
<b>Параметры системы</b>		
Объем пермеата, л/день	300 000	300 000
Расход пермеата, л/(м <sup>2</sup> · ч)	17	410
Площадь мембран, м <sup>2</sup>	1070	46
Срок годности мембраны, лет	1	—
Потребление вспомогательных материалов, кг/м <sup>3</sup> фильтрата	—	24
Рабочие часы в день	16	16
Рабочих дней в год	250	250
Затраты рабочего времени, ч/день	2	8
Капитальные затраты, \$	150	50
Потребление электроэнергии, кВт	150	50
<b>Затраты, \$/год</b>		
Амортизация, капзатраты @ 0,149	127 540	30 840
Стоимость энергии, \$0,075/кВт	45 000	15 000
Замена мембран, \$150/м <sup>2</sup>	160 500	—
Фильтровальные вспомогательные материалы, 1 800 000 кг @ 0,26 кг	—	468 000
Мойка и очистка, \$0,10/(м <sup>2</sup> · день)	26 750	—
Технический уход (общая сумма)	3000	10 000
Стоимость рабочей силы, \$20/ч	10 000	40 000
<b>Общие затраты</b>	<b>372 790</b>	<b>573 480</b>

8,5 °Брикса представлено в табл. 5.11 [12] (использовался испаритель с трехкратной принудительной циркуляцией и с экономией пара 2,78).

Данная оценка включает затраты лишь на энергию и замену мембран, так как прочие затраты для обеих систем вполне сопоставимы. Результаты свидетельствуют о существенных экономических преимуществах обратного осмоса. В ходе предварительного концентрирования от 4,5 до 8,5 °Брикса удаляется около половины воды, подлежащей удалению в процессе парообразования. Считается, что с помощью обратного осмоса технически осуществимо концентрирование до 15 °Брикса и, кроме того, предварительное концентрирование с помощью мембранных технологий наносит продукту меньше термических повреждений и меньше загрязняет воздух.

### 5.6.7 Экономическая целесообразность сокращения стоков

Экономическая целесообразность применения мембран для сокращения стоков существенно зависит от нежелательных затрат на отвод сточных вод, которые зависят от назначения предприятия.

Главное внимание следует уделять использованию концентратов — прежде всего, на корм скоту и в качестве удобрений. На предприятиях по переработке фруктов и овощей эта проблема усугубляется также непродолжительностью рабочего сезона.

В общем, можно сказать, что применение мембранных технологий не следует обосновывать лишь затратами на переработку стоков. Регенерация побочных продуктов, моющих средств и тепла дополняет экономические преимущества и делает эффективным внедрение мембран. Примером могут служить регенерация сахаров из ополаскивающей воды, химикатов — из промывочных вод и тепла — из воды для бланширования.

Таблица 5.11. Предварительное концентрирование томатного сока

	Обратный осмос	Выпаривание
<i>Параметры системы</i>		
Расход напорного потока, л/ч	40 000	40 000
Расход удаляемой воды, л/ч	18 820	18 820
Площадь мембран, м <sup>2</sup>	429	—
Потребление электроэнергии, кВт	180	32
Потребление пара, кг/ч	—	6775
Рабочих дней в год	250	250
Затраты рабочего времени, ч/день	24	24
Рабочих дней в год	50	50
<i>Затраты, \$/год</i>		
Стоимость энергии, \$0,04/кВт	8640	1536
Стоимость пара, \$0,18/кг	—	146 247
Замена мембран (общая сумма)	14 112	—
<b>Общие затраты</b>	<b>22 772</b>	<b>147 783</b>

Сточные воды, содержащие растворенные органические вещества, обрабатываются биологическими методами. Наилучшим способом обработки сточных вод, содержащих растворенные вещества в небольших концентрациях, является аэробная очистка, тогда как анаэробная очистка лучше подходит для более концентрированных стоков. Мембранные технологии могут применяться для концентрирования сточных вод с невысокими концентрациями растворенных веществ для последующей анаэробной очистки, что дает дополнительные преимущества возможности регенерации воды.

## Список обозначений

$A$	Площадь мембран в системе, $\text{м}^2$
$b$	Толщина мембраны, $\text{м}$
$c$	Концентрация растворенного вещества, $\text{кг}/\text{м}^3$
$C$	Концентрация растворенного вещества в ретентате у поверхности мембраны, $\text{кг}/\text{м}^3$
$C_p$	Концентрация растворенного вещества в пермеате, $\text{кг}/\text{м}^3$
$D$	Коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$
$d_s$	Эквивалентный диаметр межмембранного канала, $\text{м}$
$d_p$	Диаметр поры, $\text{м}$
$\frac{d_c}{d_u}$	Градиент концентрации, $\text{кг}/\text{м}^2$
$J$	Расход растворенного вещества, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$
$k$	Константа Больцмана, $1,381 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}/\text{К}$
$k_m$	Пропускная способность мембраны относительно потока растворенного вещества (константа проводимости мембраны), $\text{м}/\text{с}$
$L$	Длина канала, $\text{м}$
$P$	Давление, $\text{Па}$
$Q$	Расход пермеата, $\text{л}/\text{ч}$
$R$	Универсальная газовая постоянная, $\text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$
$r_b$	Сопротивление слоя задержанных частиц, $\text{Па} \cdot \text{с}/\text{м}$
$r_m$	Сопротивление мембраны, $\text{Па} \cdot \text{с}/\text{м}$
$r_s$	Радиус сферической частицы, $\text{м}$
$S$	Расход растворенного вещества (проводимость), $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$
$S_c$	Площадь поверхности твердых частиц на единицу объема намывного слоя, $1/\text{м}$
$T$	Абсолютная температура, $\text{К}$
$V$	Парциальный молярный объем растворителя или объем данной порции, $\text{м}^3$
$x$	Молярная доля растворителя
$y$	Направление диффузии, $\text{м}$
$\alpha$	Коэффициент пропорциональности осмотического давления и концентрации, $\text{Па}$
$\beta$	Коэффициент массоотдачи, $\text{м}/\text{с}$
$\delta$	Толщина пограничного слоя, $\text{м}$
$\delta_c$	Толщина намывного слоя, $\text{м}$

$\epsilon$	Мнимая доля в намывном слое
$\phi$	Коэффициент пропорциональности между сопротивлением намывного слоя и давлением, с/м
$\gamma_w$	Степень сдвига, 1/с
$\mu$	Динамическая вязкость, Па · с
$\nu$	Кинематическая вязкость, м <sup>2</sup> /с
$\pi$	Осмотическое давление, Па
$\rho$	Коэффициент уменьшения объема
$\sigma$	Отвод растворенного вещества (задерживающая способность мембраны)

$$Re = \frac{U \cdot d_3}{\nu} \quad \text{— критерий Рейнольдса}$$

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad \text{— критерий Шмидта}$$

$$Sh = \frac{\beta \cdot d_3}{D} \quad \text{— критерий Шервуда}$$

## Литература

1. **Effective Industrial Membrane Processes: Benefits and Opportunities**, 1991. Turner, M. K., Ed., Elsevier Applied Science, London.
2. **Handbook of Industrial Membrane Technology**, 1990. Potter, M. C., Noyes Publications, Park Ridge, NJ.
3. **Inorganic Membranes, Synthesis, Characteristics and Applications**, 1991. Bhawe, R. R., Ed., Van Nostrand Reinhold, NY.
4. **Membrane Filtration: Handbook. Selection Guide**, 193. Merlo, C. A., Rose, W. W., and Ewing, N. L., National Food Processors Association, Dublin. CA.
5. **Membrane Handbook**, 1992. Ho, W. S. W. and Sirkar, K. K., Ed., Van Nostrand Reinhold, NY.
6. **Membrane Separations Technology, Principles and Applications**, 1995. Noble, R. D. and Stern, S. A., Eds., Elsevier Applied Science, London.
7. **Reverse Osmosis**, 1970. Sourirajan, S., Academic Press, NY.
8. **Ultrafiltration Handbook**, 1986. Cheryan, M., Technomic Publishing, Lancaster, PA.
9. Agrawal, J. P. and Sourirajan, S. 1969. Specification, selectivity and performance of cellulose acetate membranes in reverse osmosis, Ind. Eng. Chem., Process Des. Dev., 8(4):439.
10. Anon., 1967. 3-A, Accepted Practice for Permanently Installed Sanitary Product-Pipelines and Cleaning Systems, 605-02, U. S. Public Health Service and the Dairy Industry Committee, International Association of Milk, Food and Environmental Sanitarians. 1966, Revised 1967.
11. Anon. 1982. Code of Federal Regulations. Title 21-Food and Drugs. Parts 175.300, 177.2600.
12. Anon. 1984. Reverse Osmosis Concentration of Tomato Juice. Patterson Candy International Limited.
13. Bemberis, I. and Neely, K. 1986. Ultrafiltration as a competitive unit process. Chem. Eng. Prog. 82(11):29.
14. Bhawe, R. R. 1991. Liquid filtration and separation with inorganic membranes, in Inorganic Membranes Synthesis, Characteristics and Applications, Bhawe, R. R., Ed., Van Nostrand Reinhold, NY, 129.
15. Bradley, R. 1993. Design consideration for reverse osmosis systems, in Reverse Osmosis, Membrane Technology, Water Chemistry, and Industrial Applications, Amjad, Z., Ed., Van Nostrand Reinhold, NY, 104.



16. Braun, M. 1994. Review of Commercial dairy applications. Practical Short Course on Membrane Separations in Food Processing, Food Protein Research and Development Center, Texas A&M University, College Station, Texas.
17. Cheryan, M. 1986a. Ultrafiltration Handbook, Technomic Publishing, Lancaster, PA, 89.
18. Cheryan, M. 1986b. Ultrafiltration Handbook, Technomic Publishing, Lancaster, PA, 171.
19. Cheryan, M. 1986b. Ultrafiltration Handbook, Technomic Publishing, Lancaster, PA, 214.
20. Cheryan, M. and Alvarez, J. R. 1995. Food and beverage industry applications, in Membrane Separations Technology, Principles and Applications, Noble, R. D. and Stern, S. A., Eds., Elsevier Applied Science, London, 415.
21. Dresner, L. and Johnson, J. S. 1980. Hyperfiltration, in Principles of Desalination, Spiegler, K. S. and Laird, A. D. K., Eds., Academic Press, NY, 401.
22. Drioli, E., Iorio, G., and Cetapano, G. 1990. Enzyme membrane reactors and membrane fermentors, in Handbook of Industrial Membrane Technology, Potter, M. C., Ed., Noyes Publications, Park Ridge, NJ.
23. Eycamp, W. 1995. Microfiltration and ultrafiltration, in Membrane Separations Technology, Principles and Applications, Noble, R. D. and Stern, S. A., Ed., Elsevier, London, 415.
24. Ko, A. and Guy, D. B. 1988. Brackish and seawater desalting, in Reverse Osmosis Technology: Applications for High Purity Water Production, Parekh, B. S., Marcel Dekker, NY.
25. Kulkani, S. S., Funk, E. W., and Li, N. N. 1992. Ultrafiltration: theory and mechanistic concepts, in Membrane Handbook, Ho, W. S. W. and Sirkar, K. K., Eds., Van Nostrand Reinhold, NY, 398.
26. Lee, C. H. 1994. Membrane applications in corn sweetener production, Practical Short Course on Membrane Separations in Food Processing, Food Processing, Food Protein Research and Development Center, Texas A&M University, College Station, Texas.
27. Merry, A. 1994. Reverse osmosis and applications of reverse osmosis in food processing. Practical Short Course on Membrane Separations in Food Processing, Food Protein Research and Development Center, Texas A&M University, College Station, Texas.
28. Ng, P., Lungblad, J., and Mitra, C. 1976. Sep. Sci. 11(3):324.
29. Padilla-Zakour, O. and McLellan, M. R. 1993. Optimization and modeling of apple juice cross flow microfiltration with a ceramic membrane, J. Food Sci. 58(2):369.
30. Porter, M. C. Concentration polarization with membrane ultrafiltration // Ind. Eng. Chem., Prod. Res. Dev. — 1972. — № 11(3). — P. 234.
31. Ray, R. J, Reverse Osmosis: cost estimates // Membrane Handbook / Ho, W. S. W. and Sirkar K. K. (eds.). — NY: Van Nostrand Reinhold, 1992. — P. 355.
32. Sourirajan, S. Reverse Osmosis. — NY: Academic Press, 1970. — 552 p.
33. Zydney A. L. and Colton C. K. A concentration polarization model for the filtrate flux in cross flow microfiltration of particulate suspensions // Chem. Eng. Commun. — 1986. — № 47. — P. 21.

# 6 УСТРОЙСТВО И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВЫПАРНЫХ АППАРАТОВ (ИСПАРИТЕЛЕЙ)

*Чин Шу Чен и Эрнесто Эрнандес*  
*Перевод С. Леошина*

## Содержание

- 6.1 Основные положения
  - 6.1.1 Парообразование
  - 6.1.2 Терминология
  - 6.1.3 Характеристики жидких пищевых продуктов
    - 6.1.3.1 *Способность к испарению*
    - 6.1.3.2 *Зависимость «температура–время»*
    - 6.1.3.3 *Пенообразование*
    - 6.1.3.4 *Образование накипи*
    - 6.1.3.5 *Загрязнение*
  - 6.1.4 Восстановление качества и аромата
- 6.2 Конструкции выпарных аппаратов и их применение
  - 6.2.1 Одно- и многокорпусные установки
  - 6.2.2 Типы выпарных аппаратов (испарителей)
    - 6.2.2.1 *Выпарной аппарат с внутренней нагревательной камерой*
    - 6.2.2.2 *Выпарной аппарат с верхней подачей продукта в виде пленки (пленочный аппарат с нисходящим движением раствора и вторичного пара)*
    - 6.2.2.3 *Выпарной аппарат с принудительной циркуляцией раствора*
    - 6.2.2.4 *Выпарной аппарат с нижней подачей продукта в виде пленки (пленочный аппарат с восходящим движением раствора и вторичного пара)*
    - 6.2.2.5 *Испарители с подводом механической энергии*
    - 6.2.2.6 *Испарители с пластинчатым теплообменником*
  - 6.2.3 Сохранение энергии и компрессия пара
  - 6.2.4 Способы применения
  - 6.2.5 Стабильность и управление

- 6.2.6 Выбор выпарных аппаратов (испарителей)
- 6.3.1 Коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи
- 6.3.2 Превышение точки кипения растворов
- 6.3.3 Эффект загрязнения
- 6.4 Расчеты выпарных аппаратов (испарителей)
  - 6.4.1 Материальный и энергетический балансы
  - 6.4.2 Зависимость «температура-время»
  - 6.4.3 Выпарной аппарат однократного выпаривания
  - 6.4.4 Многокорпусные выпарные установки
- 6.5 Эксплуатационная оценка промышленного выпарного аппарата для работы с цитрусовыми
- 6.6 Экономические аспекты
  - 6.6.1 Оптимизация затрат
  - 6.6.2 Способы экономии энергии
  - 6.6.3 Экономический эффект от экономии энергии

Список обозначений

Список сокращений

Значения индексов

Литература

Дополнительная отечественная литература

## 6.1 Основные положения

Выпаривание — это отделение летучей жидкости от нелетучих сухих веществ на основе принципа парообразования (испарения). При наличии большого количества воды (например, в жидком пищевом продукте) ее удаление производится методом выпаривания. В пищевом продукте могут содержаться вкусовые и ароматические соединения, обладающие большей летучестью, чем сама вода, либо он может иметь такую вязкость, при которой текучесть продукта является низкой. На греющих поверхностях возможно образование накипи (пригара) пищевого продукта, кристаллических образований, возможно также пенообразование. Кроме того, продукт может иметь и относительно высокую температуру кипения. Такой широкий спектр характеристик жидких пищевых продуктов способствовал появлению разнообразных типов выпарных аппаратов (испарителей), используемых в пищевой промышленности. На конструкцию и работу применяющихся в пищевой промышленности выпарных аппаратов большое влияние оказал практический опыт их использования.

Выпаривание имеет целью получение концентрированного продукта, содержащего в растворе требуемое количество сухих веществ, или удаление загрязняющих веществ из промышленных стоков. Основными задачами выпаривания жидких пищевых продуктов являются:

- уменьшение их объема и массы и, соответственно, последующее сокращение затрат на упаковку и хранение, а также упрощение транспортировки;
- сокращение энергопотребления в процессе последующего процесса сушки;
- уменьшение активности воды ( $a_w$ ) для улучшения стабильности продукта при хранении.

### 6.1.1 Парообразование

Парообразование (испарение) — это физическое явление, при котором вещество из жидкого состояния переходит в газообразное. Несложно представить закрытый, термически изолированный сосуд, частично заполненный жидкостью. Воздух из сосуда удален, и жидкость испаряется в освобожденное от воздуха пространство, где таким образом возникает давление. По истечении некоторого времени в этом пространстве наступает момент насыщения, при котором за любой фиксированный промежуток времени обратно в жидкость возвращается такое же количество молекул, какое из нее переходит в пар. Это и есть состояние равновесия, при котором устанавливается постоянное давление пара (при этом так называемое «чистое испарение» равно нулю). Если же из сосуда происходит утечка пара (что означает удаление отделяющихся от жидкости молекул без возможности их последующего возвращения в жидкость), то процесс испарения продолжится, но с меньшей интенсивностью, так как в результате испарения понижается температура жидкости.

И наоборот, если обеспечивается постоянный нагрев сосуда для поддержания температуры кипения, то интенсивность испарения будет сохраняться на высоком уровне. Из этого следует, что для обеспечения процесса испарения должны быть соблюдены два условия:

- должно быть подведено количество теплоты, необходимое для испарения жидкости;
- переходящие из раствора в парообразное состояние молекулы должны непрерывно удаляться [2].

### 6.1.2 Терминология

Выпарной аппарат (испаритель) — это устройство, в котором исходная жидкость с низким содержанием сухих веществ выпаривается до получения сгущенного продукта (концентрата). Исходным материалом может быть некоторый раствор, тестообразная масса или взвесь сухих материалов в жидкости. Необходимая для испарения теплота поступает благодаря процессу теплопередачи от насыщенного пара к раствору через разделяющую их металлическую греющую поверхность. Таким образом, работа выпарного аппарата предусматривает в основном подвод энергии (тепла — для испарения и конденсации), перемещение некоторой массы (удаление влаги) и обеспечение потока (загружаемого материала и пара).

Применяемые в пищевой и молочной промышленности выпарные аппараты работают в большинстве случаев под глубоким вакуумом. Вакуумный испаритель состоит из трех основных элементов: теплообменника, обеспечивающего теплопередачу от пара к пищевому продукту, отделителя жидкости от пара (сепаратора) и вакуумной установки в виде механического вакуум-насоса или вакуум-насоса эжекторного типа.

Устройства выпарных аппаратов, в которых происходит теплопередача, называются нагревательными камерами или калоризаторами. Отделители жидкости от пара называют пароотделителями или флэш-камерами. Термином «модуль» называют базовый (монтажный) модуль испарителя с одной нагревательной камерой. Кипение в одном или более модулей происходит при одном и том же давлении, что ис-

пользуется для индикации очередности прохождения пара через испаритель. Это используется и для индикации очередности прохождения через испаритель потока продукта. Многокорпусный выпарной аппарат — это испарительная система, в которой вторичный пар первой ступени выпаривания используется в качестве греющего агента в следующем корпусе при более низкой температуре. Количество ступеней выпаривания при использовании многокорпусных выпарных аппаратов может быть различным.

Выпарные аппараты оцениваются по двум основным параметрам: по паропроизводительности и производительности по испаренной влаге [31]. Паропроизводительность может быть измерена количеством килограммов выпаренной влаги на килограмм затраченного греющего пара, а производительность по испаренной влаге — количеством килограммов воды, выпаренных за 1 ч (или на 1 м<sup>2</sup>/ч)<sup>1</sup>. Экономичность вакуумных испарителей находится в диапазоне от 0,75 до 0,95  $N$ , где  $N$  — число ступеней (корпусов). Например, для аппарата однократного выпаривания экономичность составит примерно от 0,75 до 0,95, а для шестикорпусной выпарной установки она будет в диапазоне от 4,5 до 5,7. Колебания в экономичности зависят от многих факторов — например, температуры на входе, изоляции, отвода вторичного пара, потери вакуума, срока службы испарителя, его конструкции (с устройством регенерации теплоты или без него) и т. д.

### 6.1.3 Характеристики жидких пищевых продуктов

Характеристики пищевых продуктов являются главным фактором, определяющим выбор того или иного типа испарителя. Некоторые из наиболее важных свойств жидких пищевых продуктов приведены ниже.

#### 6.1.3.1 Способность к испарению

Теплофизические и реологические свойства жидких пищевых продуктов изменяются в зависимости от температуры и содержания сухих веществ (СВ) [22]. В общем случае удельная теплоемкость жидких пищевых продуктов уменьшается с увеличением содержания СВ. Типовое уравнение для расчета удельной теплоемкости сахаросодержащих растворов выведено в работе [6]:

$$c_p = 4,187 \{1 - X_s [0,57 - 0,0018(T - 20)]\}, \quad (6.1)$$

где  $c_p$  — удельная теплоемкость (кДж/кг °С);  $T$  — температура (°С);  $X_s$  — массовая доля растворимых СВ.

Удельный вес или плотность жидких пищевых продуктов увеличивается с ростом содержания СВ. Для соотнесения измеренного удельного веса или плотности с концентрацией различных растворов было разработано несколько шкал. Например,

<sup>1</sup> В отечественной научно-технической литературе используется не понятие «паропроизводительность» (кг испаренной влаги/кг греющего пара), а понятие «удельный расход греющего пара» (кг греющего пара/кг испаренной влаги). Оба понятия являются удельными характеристиками процессов выпаривания и выпарных аппаратов и по сути являются взаимнообратными друг другу. — *Здесь и далее прим. науч. ред.*

шкала Кевенна (*Quevenne*) является сокращенной шкалой удельного веса, используемый главным образом в молочной промышленности. Шкала Брикса (*Brix*) используется на производствах фруктовых соков для определения эквивалента растворимых СВ по сахарозе. Термин «по Бриксу» или «градусы Брикса (°B)» используются наряду с понятием процента содержания сахарозы или растворимых СВ (по массе) и определяются при помощи замеров плотности.

Вязкость большинства жидких пищевых продуктов (таких, как фруктовые и овощные соки) резко увеличивается с увеличением содержания СВ и при понижении температуры [21]. Высокая вязкость влияет не только на теплопередачу — она может стать слишком большой, и продукт утратит текучесть. Текучесть продукта необходима для его распределения по всей поверхности нагрева в процессе выпаривания, что предотвращает локальные подгорания продукта или его локальный перегрев.

Давление пара большинства водных растворов меньше, чем давление воды при той же температуре. Следовательно, при заданном давлении температура кипения растворов выше, чем чистой воды. Этот факт называется превышением точки кипения<sup>1</sup> [18].

Температура кипения жидких пищевых продуктов может также значительно возрастать с увеличением содержания СВ. Значение превышения точки кипения следует вычитать из перепада температуры, который при расчетах оборудования определяется с помощью специальных таблиц.

#### 6.1.3.2 Зависимость «температура–время»

Желаемые качественные характеристики пищевых продуктов (аромат, цвет, пищевая ценность и т. д.) во многом зависят от температуры и могут ухудшиться при относительно непродолжительном по времени нагреве. Оптимальное качество достигается в процессе сгущения пищевых продуктов, когда продолжительность обработки и температура поддерживаются на возможно более низких уровнях. В общем смысле системы испарения под вакуумом при высоких температурах и в течение непродолжительного времени более предпочтительны, чем традиционные системы испарения при более низких температурах и более продолжительном процессе.

#### 6.1.3.3 Пенообразование

Некоторые пищевые продукты, особенно жидкие белоксодержащие, могут в процессе перемешивания и выпаривания пениться. Отвод пара из испарителя сопровождается стабильной пеной, что приводит к потерям продукта. В экстремальных случаях вся масса продукта может вспениться. Частично решить эту проблему позволяет применение специальных пеноподавляющих веществ, однако выбор последних ограничен возможностями их использования в производстве пищевых продуктов.

<sup>1</sup> В отечественной научно-технической литературе разность температур кипения раствора и чистого растворителя принято называть температурной депрессией или физико-химической депрессией. Помимо этого вида температурных потерь при выпаривании имеет место гидростатическая депрессия (превышение температуры кипения нижележащих слоев раствора по сравнению с температурой кипения вышележащих слоев вследствие действия гидростатического давления), а также гидравлическая депрессия (разность между температурами вторичного пара непосредственно над раствором и в конце паропровода вторичного пара, то есть непосредственно в конденсаторе).

#### 6.1.3.4 Образование накипи

Некоторые растворы образуют отложения накипи на греющих поверхностях. Общий коэффициент теплопередачи при этом будет постепенно уменьшаться до тех пор, пока работу испарителя не остановят и не очистят нагревательные элементы.

Накипь может также образовываться в результате локальных подгораний из-за неправильной работы оборудования. При возникновении плотной и плохо растворимой накипи очистка оборудования становится более трудоемкой и дорогостоящей.

#### 6.1.3.5 Загрязнение

Загрязнение можно охарактеризовать как формирование отложений на греющих поверхностях, что препятствует процессу теплопередачи и увеличивает сопротивление потоку жидкости. Загрязнение греющих поверхностей биологическими жидкостями — явление весьма сложное. Во многих случаях здесь имеют значение химические реакции, а также растворимость и коррозионные свойства. Для восстановления желаемой производительности испарителя необходимо составить и соблюдать график его очистки.

### 6.1.4 Восстановление качества и аромата

В пищевой промышленности выпариваемая в большом объеме жидкость содержит чувствительные к тепловым воздействиям ароматизирующие вещества. Вода и летучие вкусовые вещества с увеличением нагрева и давления пара удаляются. Вместе с тем потеря летучих компонентов в процессе выпаривания многих жидких пищевых продуктов (например, кофе или фруктовых соков) в большинстве случаев нежелательна. Для восстановления улетучившихся вкусовых компонентов были разработаны различные системы. Такие летучие компоненты, восстановленные в процессе производства концентратов фруктового сока, называют эссенциями.

Устройство для восстановления эссенции представляет собой комбинацию оборудования для отгонки летучих фракций, ректификации, дистилляции пара и удаления жидкой фазы [26].

При сгущении большинства фруктовых соков производится восстановление аромата летучих веществ с помощью многокорпусных агрегатов. Эта газообразная фракция затем подается в систему дистилляции фракций, где разбавленные ароматизирующие компоненты пропускаются через дистилляционную колонну с концентрированием их в 100–200 раз, и результат добавляется к концентрату, полученному на последнем этапе. Термин «в  $n$  раз» обозначает уменьшение объема. Например, пятикратное концентрирование приводит к уменьшению объема на 80%. Чтобы предотвратить ухудшение качества ароматизирующих веществ вследствие термообработки и окисления, процесс отгонки производится под вакуумом, а необходимые газообразные компоненты конденсируются при низких температурах.

В производстве пищевых продуктов отнюдь не всегда необходимы описанные выше устройства, однако, например, в процессе выпаривания молока удаление летучих веществ, создающих неприятный привкус или запах, может оказаться полезным.

## 6.2 Конструкции выпарных аппаратов и их применение

### 6.2.1 Одно- и многокорпусные установки

Выпарной аппарат (испаритель) может быть сконструирован как однокорпусное устройство или как несколько испарительных модулей, объединенных в многокорпусную установку, которая может быть использована и в качестве системы рециркуляции. Циркуляция раствора может обеспечиваться естественной конвекцией или при помощи механического воздействия.

Многокорпусные выпарные аппараты широко применяются в самых разных технологических операциях, и принцип их работы хорошо известен. Два и более выпарных аппарата соединяются таким образом, что вторичный пар от первой операции выпаривания служит теплоносителем для следующей операции и т. д. На последней операции с помощью конденсатора обеспечивается разрежение и удаление неконденсируемых веществ. Первой операцией многокорпусного испарителя является та, при которой используется первичный греющий пар с максимальным давлением. Таким образом, перепад давлений между паром и конденсатором распространяется на последующие операции. Давление пара с каждой последующей операцией уменьшается.

Температура пара определяется путем измерения давления и последующего нахождения температуры с помощью таблиц. Температура жидкости, подвергающейся кипению, определяется путем измерения давления вторичного пара и расчета по таблицам соответствующей температуры. Различие между этими температурами называется температурным скачком<sup>1</sup>.

### 6.2.2 Типы выпарных аппаратов (испарителей)

Ни один из типов испарителей не удовлетворяет полностью потребностям производства жидких пищевых продуктов. Выбор того или иного типа испарителя обусловлен требованиями к качеству продукта, условиями теплопередачи, потреблением энергии и стоимостным фактором. На практике используются трубчатые и пластинчатые теплообменники, нагреваемые паром, и к основным их производителям в США относятся *APV Crepaco, Inc. (Chicago, IL)*, *Alfa-Laval, Inc. (Fort Lee, NJ)*, *Cook Machinery (Dunedin, FL)*, *Dedert Corp. (Olympia, IL)*, *FMC (San Jose, CA)*, *GEA Food and Process Systems Corp. (Columbia, MD)*, *Niro Evaporators, Inc. (Columbia, MD)*, *Signal Swenson Div. (Harvey, IL)*, в Италии — *Tito Manzini & Figli S.P.A. (г. Парма)* и др. Наиболее распространенные типы испарителей описаны в работах [18, 19, 30].

#### 6.2.2.1 Выпарной аппарат с внутренней нагревательной камерой

Выпарной аппарат с внутренней нагревательной камерой — это один из первых испарителей (с нагревательной камерой в виде системы коротких труб) (рис. 6.1). Он

<sup>1</sup> Строго говоря, для нахождения температуры кипения раствора по температуре вторичных паров (если она измерена в конденсаторе) необходимо к последней из упомянутых температур прибавить величины температурной, гидростатической и гидравлической депрессий (см. предыдущее примечание).



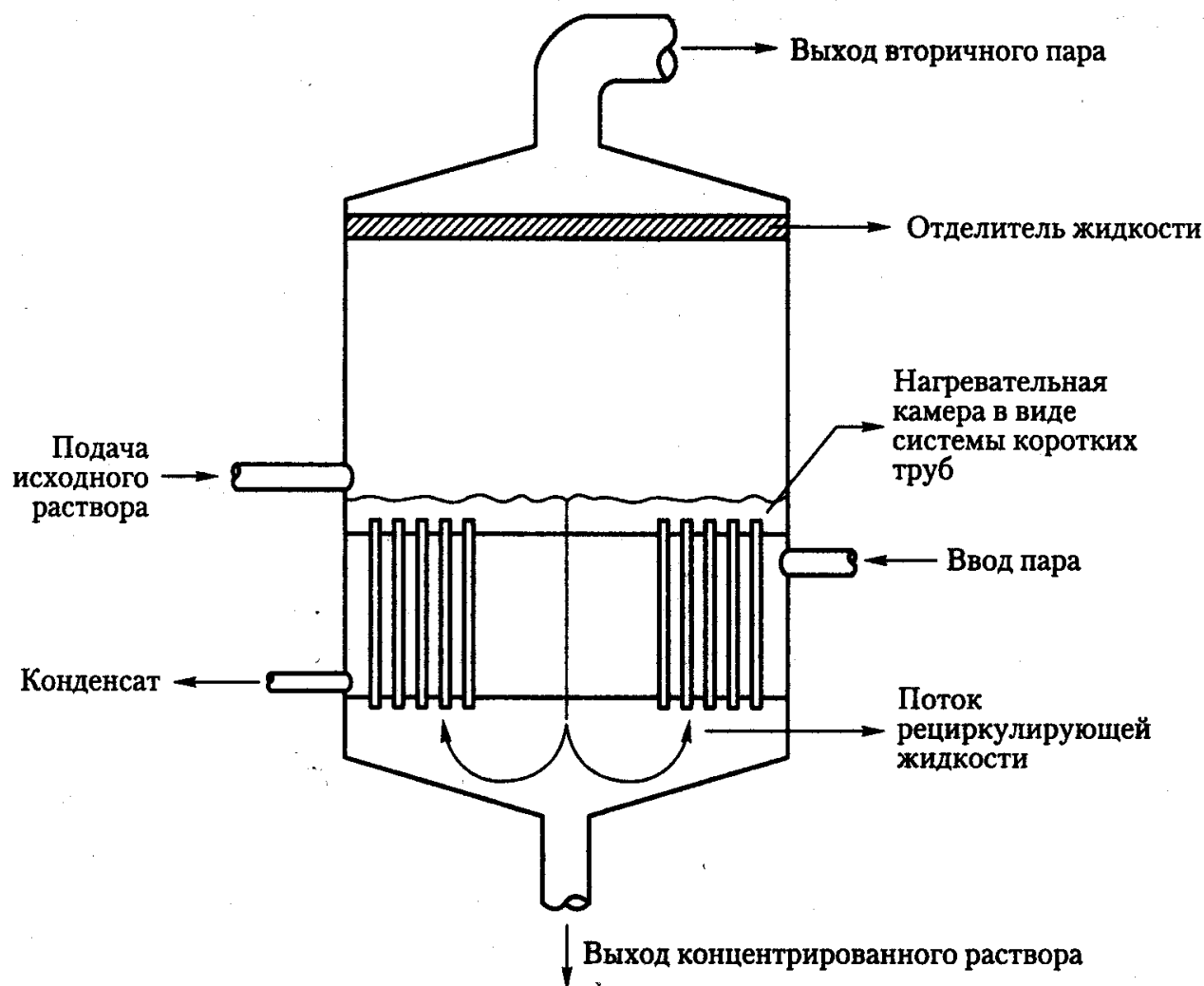


Рис. 6.1. Схема типичного выпарного аппарата с внутренней нагревательной камерой фирмы *Swenson Evaporator Co.*

работает при высоких температурах и используется для работы с продуктами, мало чувствительными к нагреву (такими, как сиропы или сахаросодержащие растворы). Подобные испарители обычно применяются в многокорпусных установках. Испаритель состоит из вертикального корпуса с пучками труб длиной от 2,5 до 3,5 м и внутренним диаметром от 33 до 46 мм. Жидкость подается в нижнюю часть корпуса, где начинается ее нагрев; по мере ее подъема вверх жидкость закипает. Образующийся вторичный пар поднимается вверх, где происходит отделение капель захваченной паром жидкости с помощью сепаратора в виде отклоняющего устройства (дефлектора). Концентрат движется вниз по центральной циркуляционной трубе и затем поступает или в систему рециркуляции, или направляется на последующую операцию. Довольно значительная продолжительность выпаривания (от 10 до 20 мин) в аппаратах такого типа делает их мало пригодными для обработки жидких пищевых продуктов, чувствительных к воздействию тепла. Такие испарители в основном используются при концентрировании сахаросодержащих растворов. Доступные при работе коэффициенты теплопередачи обычно составляют от 1000 до 1500 Вт/(м<sup>2</sup> · К).

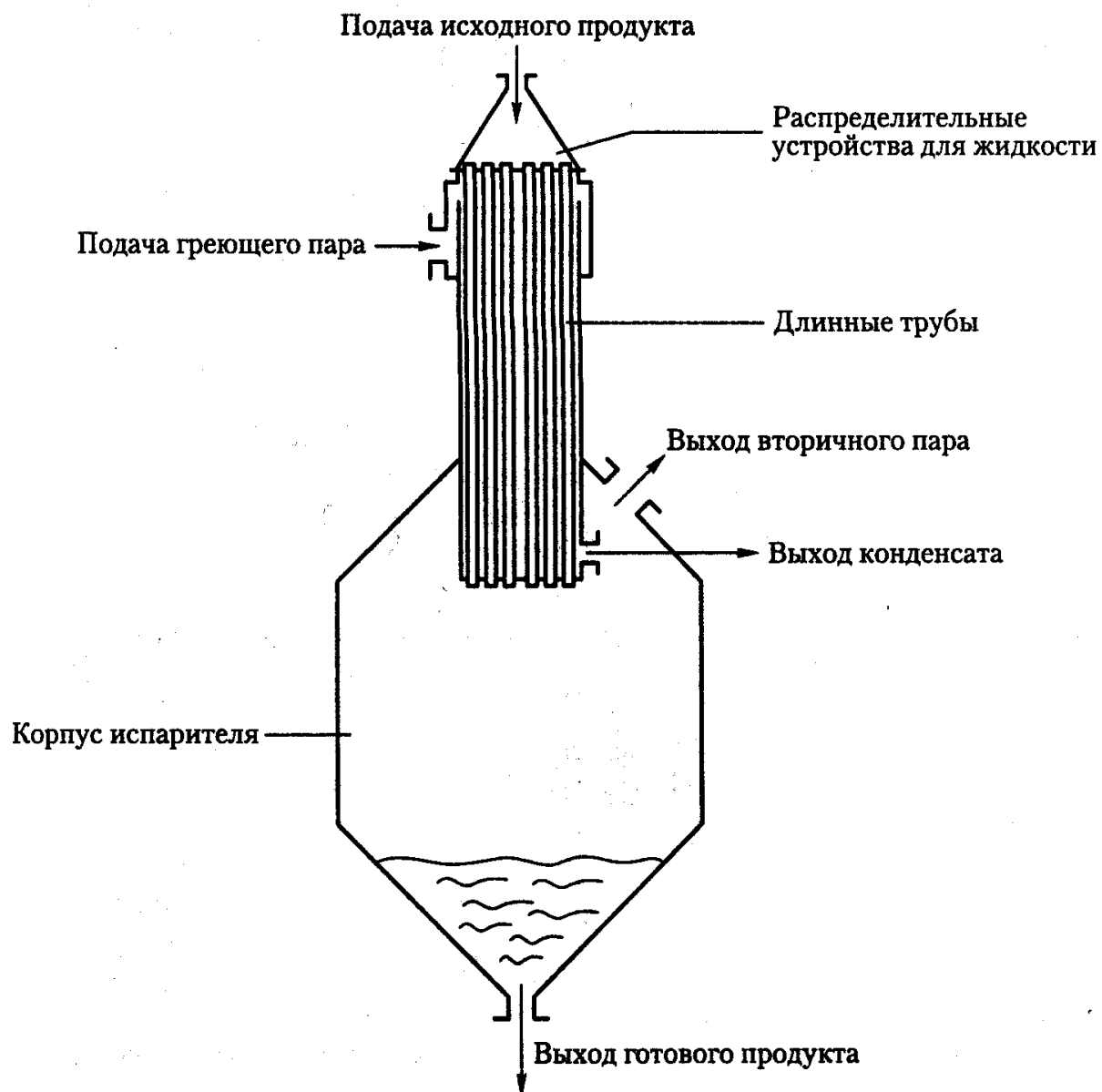


Рис. 6.2. Схема испарителя с верхней подачей материала в виде пленки

**6.2.2.2. Выпарной аппарат с верхней подачей продукта в виде пленки  
(пленочный аппарат с нисходящим движением раствора и вторичного пара)**

Вертикальный испаритель с длинными трубами (*LTV, Long-Tube Vertical*) широко применяется в пищевой промышленности. Этот тип испарителя используется для продуктов, чувствительных к нагреву. Трубы у него обычно имеют длину от 3,5 до 12 м, а внутренний диаметр — от 25 до 50 мм. В испарителе с верхней подачей продукта в виде пленки (рис. 6.2) жидкость подается в верхнюю часть труб и движется по их внутренним стенкам в виде пленки. По мере того как жидкость попадает в верхнюю часть испарителя, формирующаяся под воздействием силы тяжести пленка жидкости стекает вниз по греющей поверхности. В процессе испарения пар заполняет центральную часть канала, и по мере ускорения движения пара вниз пленка становится все тоньше. Время такой операции обычно бывает небольшим (от 0,5 до 2,0 мин), а температура кипения мало меняется по длине труб. Типичной пробле-

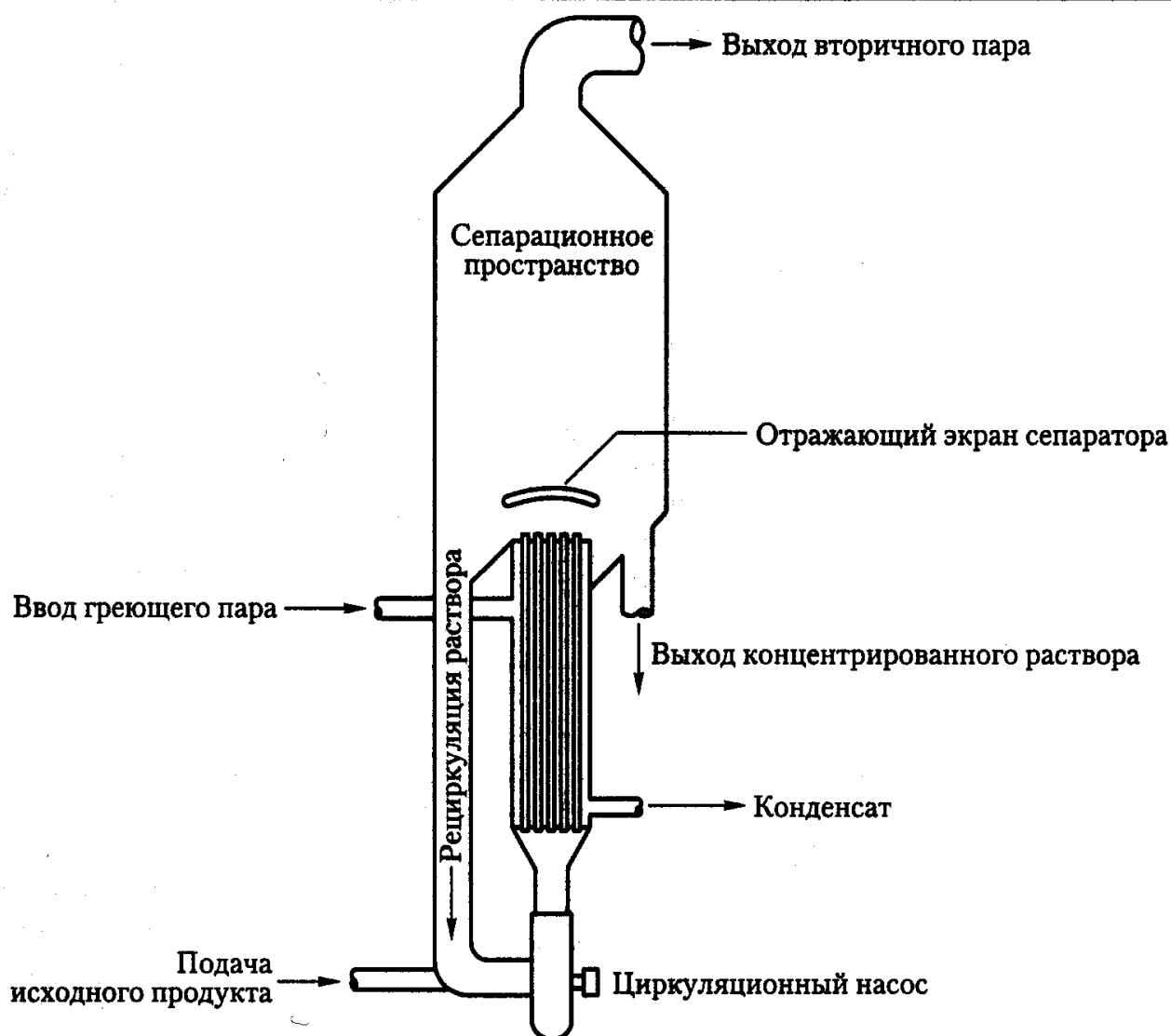


Рис 6.3. Схема принудительного длиннотрубного испарителя с принудительной циркуляцией (Swenson Evaporator Co.)

мой, встречающейся при использовании подобного типа испарителей, является закупоривание распределительной системы взвешенными или не растворившимися частицами, что требует систематической и тщательной прочистки. Проблемы подачи материала на стенки труб, где происходит испарение, могут быть решены путем применения распылительных форсунок (другой альтернативой может быть использование на верхней части труб перфорированной пластины с отверстиями на входе каждой трубы).

Для первой ступени выпаривания коэффициент теплопередачи составляет порядка  $2500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , тогда как для последней (в многокорпусных установках) его величина составляет примерно  $1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Подобная система выпаривания обычно используется для сгущения молока и фруктовых соков.

### 6.2.2.3 Выпарной аппарат с принудительной циркуляцией раствора

Этот тип испарителя (рис. 6.3) используется для вязких жидкостей или для продуктов, содержащих не полностью растворенные сухие вещества. Для этого типа оборуд-

дования по сравнению с испарителями с естественной циркуляцией в меньшей степени характерны подверженность загрязнению, образование накипи или отложение солей. Жидкость может подаваться через нагревательный элемент (калоризатор) с постоянной скоростью, независимой от скорости испарения, что облегчает процесс анализа и контроля. Скорость движения жидкости по трубам может превышать 5 м/с. Данная система обычно проектируется так, что рециркуляция жидкости происходит под давлением через нагревательный элемент. Кипения не произойдет до тех пор, пока продукт не поступит в сепарационную камеру, в которой и происходит парообразование. Калоризатор может быть внешним или внутренним, вертикальным или горизонтальным — в зависимости от целевого назначения. Такого типа системой обычно выпаривают вязкие пищевые продукты, например, продукцию типа томатной пасты. Средние коэффициенты теплопередачи в этом случае составляют свыше 2000 Вт/(м<sup>2</sup> · К). Испарители с принудительной циркуляцией обычно дороже аппаратов с верхней подачей продукта в виде пленки из-за необходимости большей площади поперечного сечения системы циркуляционных труб и мощных рециркуляционных насосов. Кроме того, здесь также велики эксплуатационные расходы.

#### 6.2.2.4 *Выпарной аппарат с нижней подачей продукта в виде пленки (пленочный аппарат с восходящим движением раствора и вторичного пара)*

Испарители подобного типа также выполняются длиннотрубными и работают в условиях глубокого вакуума (рис. 6.4). Они могут использоваться в рециркуляционных или однокорпусных установках и в одно- или многоступенчатых режимах. Их обычно используют для выпаривания томатных или фруктовых соков. В испарителях данного типа имеются трубы из нержавеющей стали длиной от 6 до 12 м. Жидкость закачивается насосом в нижнюю часть испарителя и под действием разрежения поднимается по трубам. В трубах выделены две зоны: жидкофазная, где осуществляется подъем поступающего материала, и зона кипения (в верхней части испарителя), в которой происходит разделение потока на две фазы. Следовательно, в нижней и верхней частях испарителя могут существенно различаться как температуры, так и коэффициенты теплопередачи, поскольку действует статическое давление, а температуры кипения при перепадах давления увеличиваются в нижней части испарителя на 5–10 °С. Время пребывания раствора составляет от 2 до 3 мин, коэффициенты теплопередачи — до 1800 Вт/(м<sup>2</sup> · К).

#### 6.2.2.5 *Испарители с подводом механической энергии*

Роторные пленочные испарители (а также аппараты скребкового типа) используются для концентрирования вязких жидкостей, чувствительных к нагреву, для которых может возникнуть проблема пенообразования. Такой испаритель состоит из корпуса большого диаметра с паровой рубашкой, обычно вертикальной. Жидкость обычно подается в верхнюю часть корпуса и посредством вращающихся лопастей распределяется по стенкам в виде тонкой пленки.

Концентрированный продукт выходит из нижней части испарителя и направляется в камеру-сепаратор, где вторичный пар отделяется от концентрированного продукта и направляется в конденсатор. Обычно скорость ротора составляет 10–15 м/с. Время обработки (несколько секунд) позволяет использовать большой перепад температур. Дан-

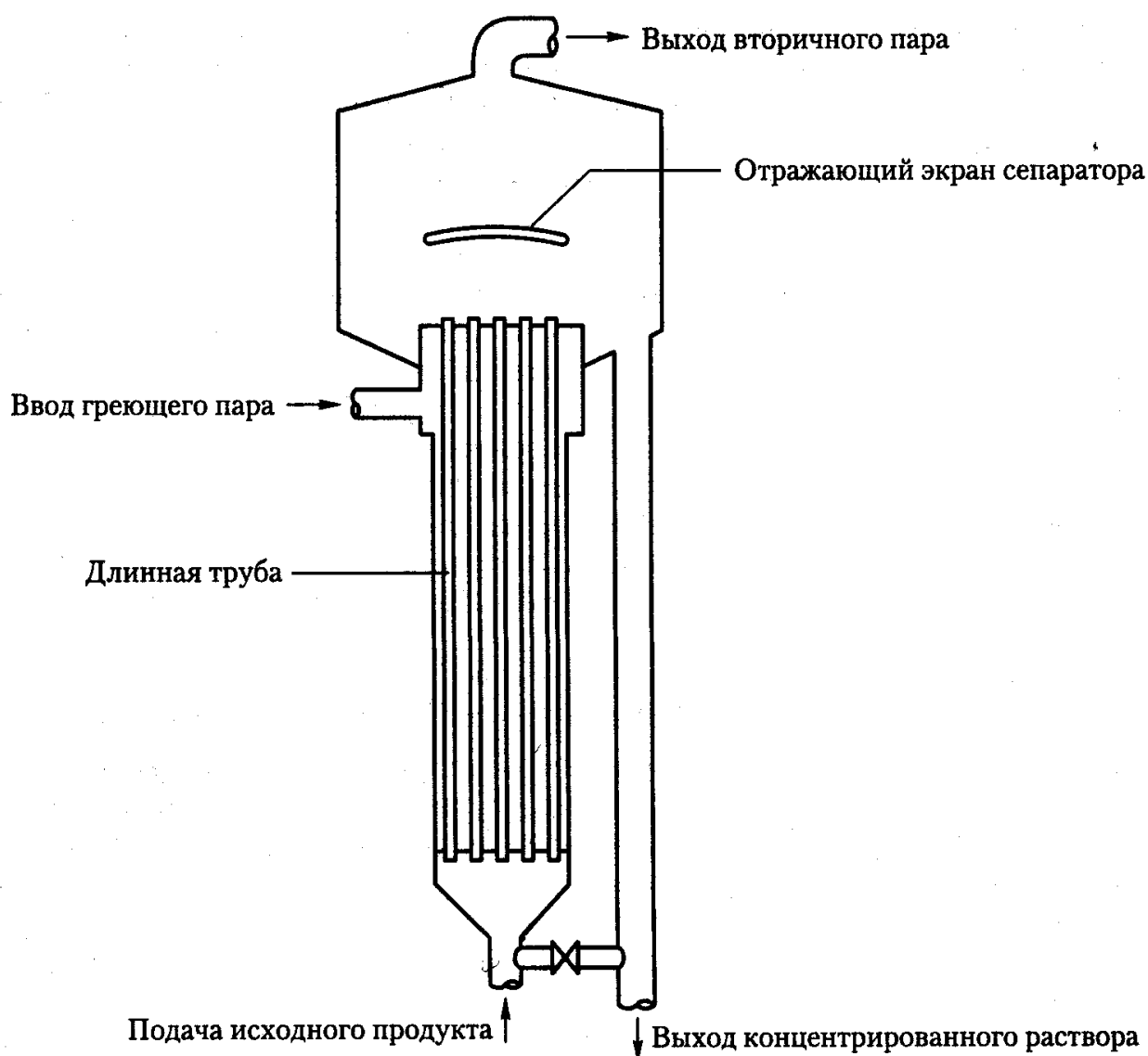


Рис. 6.4. Схема вертикального длиннотрубного испарителя (*Swenson Evaporator Co.*)

ный тип испарителя обычно эксплуатируется в одноступенчатом режиме, однако его сравнительно дорогая конструкция и затраты на технический уход и обслуживание существенно лимитируют его применение ограниченным кругом технологий по концентрированию чувствительных к нагреву жидкостей. Такие испарители используются для концентрирования жидких пищевых продуктов со взвешенными сухими веществами и вязкостью до 20 000 мПа · с. Коэффициенты теплопередачи — до 4000 Вт/(м<sup>2</sup> · К)<sup>1</sup>.

#### 6.2.2.6 Испарители с пластинчатым теплообменником

В пищевой промышленности используются испарители, в которых подача материала осуществляется с помощью принудительной циркуляции через пластинчатый теплообменник, после чего материал поступает в камеру-сепаратор. Подобные испа-

<sup>1</sup> Отечественный и зарубежный опыт конструирования, исследований и промышленной эксплуатации роторных пленочных испарителей подробно освещен в книге Василюк И. М., Сабуров А. Г. Роторные пленочные аппараты в пищевой промышленности. — М.: Агропромиздат, 1989. — 136 с.

рители были разработаны фирмой APV в 1957 г. в качестве альтернативы кожухотрубным испарителям с внутренней нагревательной камерой. В пластинчатых испарителях имеется возможность регулирования производительности благодаря простому добавлению пластин в теплообменник и более компактной конструкции с невысокими требованиями к размерам производственного помещения.

### 6.2.3 Сохранение энергии и компрессия пара

При переработке жидких пищевых продуктов путем выпаривания потребляется огромное количество энергии [27]. На получение 1 кВт электроэнергии тратится примерно 3 кДж, а количество энергии, требуемое для испарения 1 кг воды, можно определить по энергии, необходимой для перехода жидкости из одного агрегатного состояния в другое (2257,1 кДж/кг при 100 °С). Преобразование топлива в пар из-за потерь энергии обычно происходит примерно с 80%-ной эффективностью. Для предотвращения термического разрушения жидких пищевых продуктов и сокращения энергопотребления, а также для снижения температуры кипения в аппаратах создается разрежение, благодаря чему становится возможным использовать пар повторно. Тем самым экономится тепловая энергия, необходимая для испарения в многокорпусных установках, в которых число корпусов обычно составляет от 2 до 7.

Вторичный пар, отводимый из испарителя, содержит значительное количество тепловой энергии, которая может быть использована повторно с помощью технологий рекуперации теплоты, то есть элементов предварительного и повторного нагрева [4]. К другим методам повторного использования части этого пара относятся способы компрессии пара [1]:

- термическая компрессия пара (TVR, ТКП);
- механическая компрессия пара (MVR, МКП).

ТКП требует меньших затрат, однако дает меньшую по сравнению с МКП компрессию.

Наличие в системе термокомпрессора обеспечивает паропроизводительность, эквивалентную примерно количеству пара, требуемому на один дополнительный корпус, но при этом его стоимость будет намного меньше. Для компрессии части выходящего из испарителя вторичного пара используется эжектор — так, что давление пара и его температура увеличиваются. ТКП обычно используется на первом корпусе установки или (на однокорпусных испарителях) там, где позволяют условия.

В большинстве случаев при МКП компрессии подвергается весь выходящий из испарителя объем пара. Компрессия поднимает давление и температуру насыщения пара настолько, что его можно вернуть в рубашку обогрева испарителя для использования в качестве греющего пара. При оптимальных условиях с помощью МКП можно достичь эффекта, эквивалентного работе 20-корпусной выпарной установки. Эту существенную экономию энергии следует соотнести с требуемыми капитальными затратами и стоимостью технического обслуживания, а также стоимостью электроэнергии для компрессора. Выходящий из компрессора пар перегрет, но обычно это не сказывается на условиях теплопередачи.

## 6.2.4 Способы применения

Кожухотрубные испарители с внутренней нагревательной камерой наиболее широко применяются различных отраслях пищевой промышленности. В подавляющем большинстве случаев для поверхностей, контактирующих с пищевым продуктом, используется нержавеющая сталь. Подача продукта может быть однократной или рециркуляционной. Циркуляция жидкости может обеспечиваться кипячением (естественная циркуляция) или механическими методами (принудительная циркуляция). В последнем случае на греющей поверхности кипение может проявиться, а может и не проявиться.

В некоторых ситуациях удобно использовать комбинацию описанных выше испарителей. Например, для производства томатной пасты обычно используют рециркуляционный испаритель (для концентрации около 20% СВ), а для получения пасты с 30%-ным содержанием СВ после испарителя осуществляется перемешивание. Производство фруктовых соков занимает одно из ведущих мест в агропромышленном секторе. Современное развитие технологии связано с производством полупродуктов — фруктовых соков и концентрированных эссенций [21]. Объем мировой торговли концентрированными фруктовыми соками в период 1977–1988 гг. увеличился почти в 4 раза, достигнув оборота в 4 млрд долларов [23]. Доминирующим продуктом в мировой торговле является концентрат апельсинового сока, производимый с помощью выпаривания. Испарительные установки, используемые в цитрусоперерабатывающей промышленности, очень громоздки (обычно используются пяти- или семикорпусные испарители).

В начале 1960-х гг. был разработан и введен в эксплуатацию особый тип испарителя, включающий секцию теплообменника (для выполнения пастеризации перед выпариванием) и устройство дистилляции (для восстановления эссенции из пара) [5]. Такие испарители с трубчатыми или пластинчатыми греющими поверхностями работают на основе принципов высокой температуры непродолжительное время (*HTST, High Temperature Short Time*). Наиболее напряженный температурный режим в такой испарительной системе — от 95 до 105 °С в течение 10 с (продолжительность операции — от 6 до 10 мин).

Наиболее часто используемый в производстве цитрусовых соков испаритель называется *TASTE (Thermally Accelerated Short Time Evaporator* — скоростной испаритель с термическим ускорением). Установку *TASTE* обычно называют системой длиннотрубного (*LTV*) высокотемпературного испарения (*HTST*) непрерывного действия, однократного прохода, с верхней подачей материала в виде пленки, многокорпусной, высокого разрежения, без компрессии.

## 6.2.5 Стабильность и управление

Многокорпусные выпарные установки чувствительны к изменениям условий эксплуатации, и поэтому управлять ими довольно сложно. Для управления установками для выпаривания применяются различные стратегии управления — от простой обратной связи до более сложных систем управления подачей [28]. Основная цель управления — регулирование тепловой нагрузки для достижения требуемой концентрации продукта независимо от изменений параметров на входе или производитель-

ности оборудования. Существует фиксированное время пребывания продукта в выпарном аппарате — от момента его подачи и до выхода концентрированного продукта. Требования по этому параметру усложняют задачу управления с использованием стандартных приемов, как и то, что массоперенос быстрее реагирует на требуемые изменения, чем энергоперенос. Для управления промышленными многокорпусными выпарными установками при работе с цитрусовыми применяются приемы обратной связи.

## 6.2.6 Выбор выпарных аппаратов (испарителей)

Выпарные установки относятся к основному технологическому оборудованию и зачастую приобретаются на основе общей ответственности. При этом задача покупателя — точно и тщательно описать технологический процесс, качественные параметры и ограничения, что позволит поставщику разработать экономичную систему, соответствующую указанным требованиям.

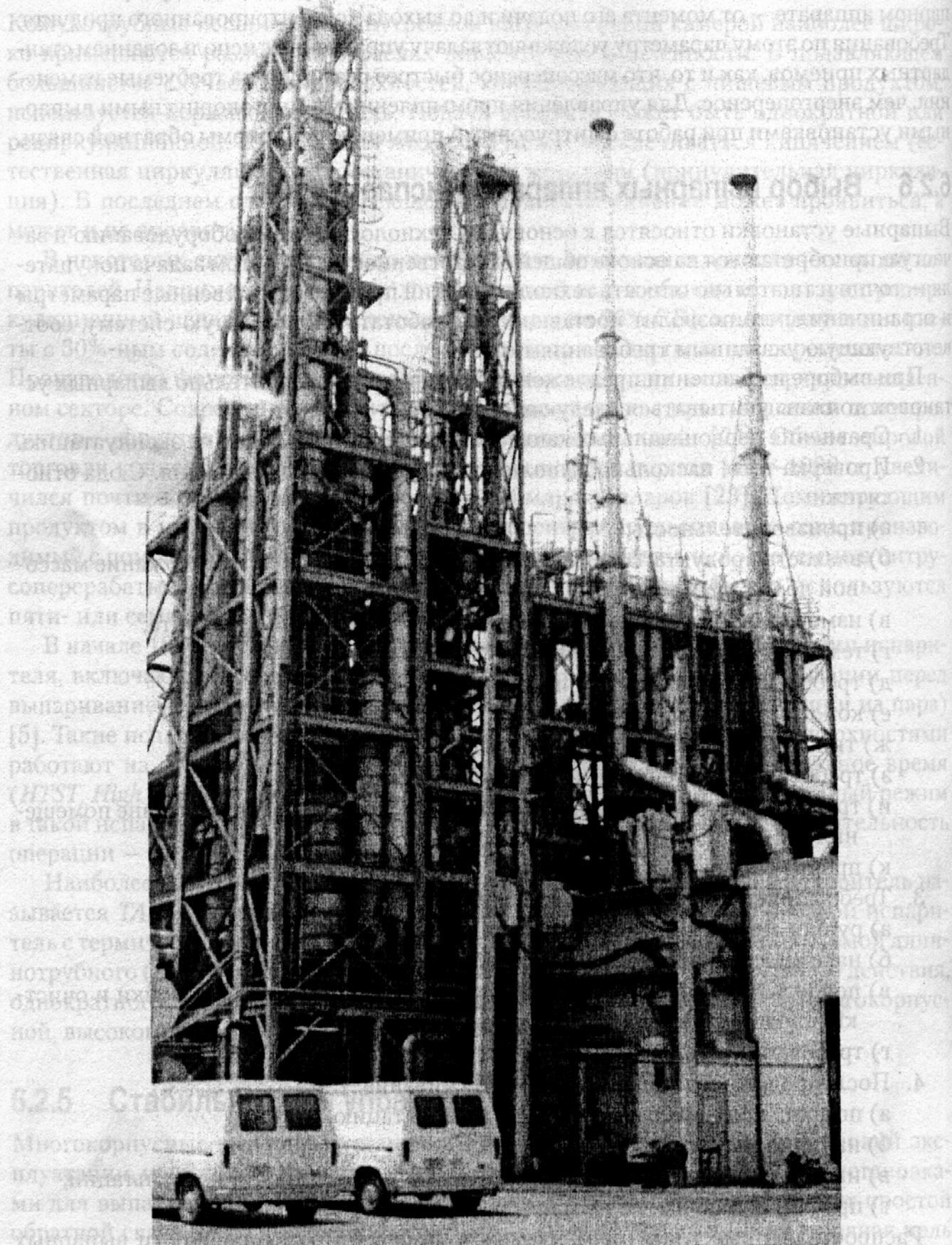
При выборе и сравнении предложений поставщиков относительно выпарных установок должны учитываться следующие факторы:

1. Сравнение первоначальных капитальных затрат и расходов на эксплуатацию.
2. Проверка того, насколько выполнены поставленные требования. Сюда относятся:
  - а) производительность;
  - б) вязкость продукта, содержание СВ и плотность (то есть содержание массовой доли сухих веществ);
  - в) изменения «температура–время» в связи с качеством продукта;
  - г) температура охлаждающей воды;
  - д) требования к параметрам пара;
  - е) конструкционные материалы;
  - ж) тип конденсирующего устройства;
  - з) требования к регенерации летучих веществ;
  - и) требования к помещениям (например, расположение внутри и вне помещения);
  - к) прочие специальные требования.
3. Требования по уходу и обслуживанию:
  - а) ручное или автоматическое управление;
  - б) надежность и простота в эксплуатации;
  - в) поддержание требуемого санитарного состояния, простота мойки и очистки, продолжительность моечного цикла;
  - г) требования к технике безопасности.
4. Послепродажное и гарантийное обслуживание:
  - а) помощь при наладке и запуске в эксплуатацию;
  - б) наличие запчастей;
  - в) инженерно-конструкторская экспертиза и возможность консультаций;
  - г) профессиональная подготовка персонала.

Распространенные типы применяемых в пищевой промышленности выпарных аппаратов приведены в табл. 6.1, которую можно использовать в качестве отправной точки при выборе того или иного оборудования.



## 6.2.4 Способы применения



## 6.2.5 Стабильность

Многократные исследования показали, что для выпаривания цитрусовых соков требуется высокая температура.

**Рис. 6.5.** Типичный выпарной аппарат для цитрусовых системы *TASTE* вертикальной конструкции (с разрешения *Alcoma Packing Co*, г. Лэйк Уэльс, штат Флорида, США)

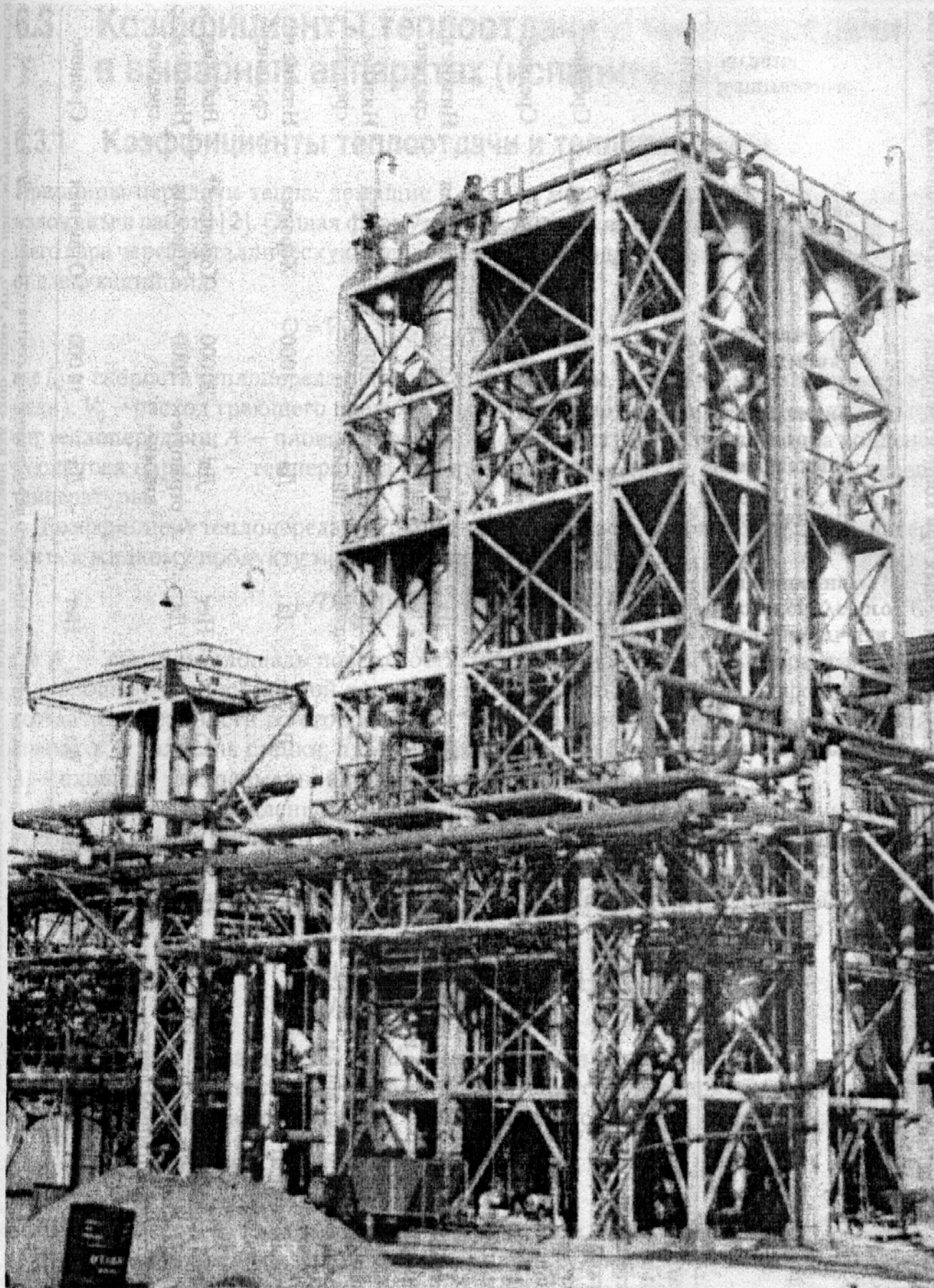


Рис. 6.6. Выпарной аппарат для цитрусовых фирмы GEA Wiegand с компрессией греющего пара (с разрешения *GEA Food and Process Systems*, штат Мэриленд, США), по [21]

Таблица 6.1. Типы выпарных аппаратов (испарителей), применяемых при концентрировании жидких пищевых продуктов

Типы выпарного аппарата	Способ циркуляции	Среднее время пребывания, мин	Пригодность для многократного выпаривания	Возможность работы со взвешенными веществами	Допустимая вязкость, сПа	Характеристика теплопередачи	Капитальные затраты
Аппарат с внутренней нагревательной камерой в виде системы длинных или коротких кипятильных труб	Естественный	40	Да	Да	100	Хорошая	Низкие
Аппарат с внутренней нагревательной камерой*	Принудительный	40	Да	Да	600	Хорошая	Средние
Аппарат с внутренней нагревательной камерой*	Принудительный	60	Да, но с ограничениями	Да	600	Плохая	Средние
Пленочный аппарат с нисходящим движением раствора и вторичного пара	Нет	0,5	Да	С ограничениями	2000	Отличная	Низкие и средние
Пленочный аппарат с противоточным движением раствора и вторичного пара	Нет	1,5	Да	С ограничениями	2000	Хорошая	Низкие и средние
Пленочный аппарат с восходящим движением раствора и вторичного пара	Нет	1,0	Да	Да	1000	Хорошая	Низкие и средние
Роторный пленочный испаритель	Нет	1,5	Нет	Да	20 000	Хорошая**	Высокие
Аппарат пластинчатый пленочный с противоточным движением раствора и вторичного пара	Нет	0,5	Да	С ограничениями	2000	Хорошая	Низкие и средние
<i>Рагаар</i>	Нет или средняя	0,1	Нет	Да	10 000	Отличная	Средние

По [10].

\* Имеются в виду емкостные выпарные аппараты с механическим и без механического перемешивания соответственно. — Прим. науч. ред.

\*\* Характеристика условий теплопередачи в роторном пленочном испарителе дана авторами как «хорошая», что, по нашему мнению, является заниженной оценкой. — Прим. науч. ред.



## 6.3 Коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи в выпарных аппаратах (испарителях)

### 6.3.1 Коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи

Принципы передачи тепла, лежащие в основе метода испарения и оборудования, изложены в работе [2]. Общая формула, описывающая теплопередачу тепла от греющего пара через металлическую стенку к продукту, подлежащему выпариванию, имеет следующий вид:

$$Q = V_0 \lambda_s = UA(T_s - T) = UA\Delta T, \quad (6.2)$$

где  $Q$  — скорость теплопередачи (количество теплоты, передаваемое за единицу времени);  $V_0$  — расход греющего пара;  $\lambda_s$  — скрытая теплота испарения;  $U$  — коэффициент теплопередачи;  $A$  — площадь греющей поверхности;  $T_s$  — температура конденсирующегося пара;  $T$  — температура выпариваемого продукта;  $\Delta T = T_s - T$  — перепад температуры.

Коэффициент теплопередачи от конденсирующегося пара через греющую поверхность к жидкому продукту можно записать в виде

$$1/UA = 1/h_s A_s + x/kA_m + 1/h_f A_f, \quad (6.3)$$

где  $A_m$  — средняя площадь поверхности теплообмена со стороны пара и продукта;  $A_s$  — площадь теплообменной поверхности со стороны пара;  $h_s$  — коэффициент теплоотдачи поверхности со стороны пара;  $k$  — термическая проводимость материала стенки;  $x$  — толщина стенки;  $h_f$  — коэффициент теплоотдачи со стороны жидкости;  $A_f$  — площадь теплообменной поверхности со стороны жидкости.

В расчетах промышленного теплопередающего оборудования зачастую возникает вопрос, какую площадь поверхности трубы использовать — внутреннюю, внешнюю или среднюю. Для расчета требуемой общей длины трубы предполагается, что используется уравнение 6.3. Для трубчатых испарителей уравнение 6.3 принимает вид:

$$\frac{1}{U_o} = \frac{1}{h_s} + \frac{d_o}{2k \ln(d_o/d_i)} + \frac{d_o}{h_f d_f}, \quad (6.4)$$

где  $d_o$  — внешний диаметр трубы;  $d_i$  — ее внутренний диаметр.

Коэффициенты теплоотдачи обычно выражаются как безразмерные параметры:  $h^* = hd/k$ , обычно как функция от чисел Рейнольдса  $Re$  и Прандтля  $Pr$ :

$$h^* = a Re^b Pr^c, \quad (6.5)$$

где  $a, b, c$  — экспериментальные константы.

В табл. 6.2 приведены некоторые формулы для  $h^*$  различных систем и типов испарителей. В большинстве случаев в пищевой промышленности средний член правой части уравнения 6.3 настолько мал, что им можно пренебречь. Кроме того, коэффициент теплоотдачи со стороны пара значительно больше коэффициента теплоотда-

Таблица 6.2. Коэффициенты теплоотдачи

$h_s^* = 1,13 \left( \frac{\rho^2 g \lambda L^3}{\mu_c k_c (T_s - T_w)} \right)^{\frac{1}{4}}$	Конденсирующий пар на вертикальных трубах, ламинарный поток, $Re < 1800$ [17]
$h_s^* = 0,007 \frac{(\rho^2 g L^3)}{\mu_c^2} Re^{0,4}$	Конденсирующий пар на вертикальных трубах, турбулентный поток, $Re > 1800$ [17]
$h_s^* = 0,725 \left( \frac{\rho^2 g \lambda D^3}{N \mu_c k_l (T_s - T_w)} \right)^{\frac{1}{4}}$	Конденсирующий пар на горизонтальных трубах [17]
$h_s^* = 0,0086 Re^{0,8} Pr^{0,6} (\sigma_f / \sigma)$	Испарители с естественной циркуляцией [24]
$h_s^* = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4}$	Испарители с принудительной циркуляцией [9]
$h_s^* = 0,042 Re^{0,17} Pr^{0,53}$	Пленочный испаритель с верхней подачей, турбулентный диапазон, $Re > 10^4$ [20]
$h_s^* = 8,5 Re^{0,2} Pr^{\frac{1}{3}} (V_s / V_f)^{\frac{2}{3}}$	Пленочный испаритель с нижней подачей [3]
$h_s^* = 3103 Re_f^{-0,98} Re_R^{0,40} B^{-0,326} We^{0,494}$	Теплообменники скребкового типа [29]

## Обозначения:

- $a$  Экспериментальная константа
- $B$  Количество скребков в аппарате скребкового типа
- $D$  Диаметр трубы, м
- $h$  Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup> · К)
- $h^*$  Безразмерный коэффициент теплоотдачи
- $L$  Длина трубы, м
- $N$  Количество труб
- $Re$  Число Рейнольдса
- $Pr$  Число Прандтля
- $We$  Число Вебера

- $g$  Ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>
- $k$  Теплопроводность, Вт/(м · К)
- $T$  Температура, °С
- $V$  Расход пара, кг/ч

## Греческие символы:

- $\mu$  Вязкость, мПа · с
- $\lambda$  Скрытая теплота испарения, кДж/кг
- $\rho$  Плотность, кг/м<sup>3</sup>
- $\sigma$  Поверхностное натяжение, н/м = Дж/м<sup>2</sup>

## Индексы

- $c$  Конденсат
- $f$  Подача
- $l$  Жидкость
- $r$  Ротор
- $s$  Сторона пара
- $w$  Сторона стенки

чи со стороны жидкости, так что последний по существу равен коэффициенту теплопередачи. В таких случаях оценка, базирующаяся на коэффициенте теплопередачи, бывает практически столь же удовлетворительна, как и на основе коэффициента теп-

Таблица 6.3. Коэффициенты теплопередачи при концентрировании жидких пищевых продуктов методом выпаривания с использованием различных типов испарителей

Наименование продукта	Концентрация, %	Температура продукта, °C	T, °C	Тип выпарного аппарата <sup>a</sup>	U, Вт/(м <sup>2</sup> · °C)	Длина трубы, м
Декстроза	27–35	93	28	FF SP	1136	6,1–8,5
	49–78	57	22	FF SP	795	6,1–8,5
Кукурузный сироп	35–43	57	22	FF SP	568	6,1–8,5
	57–82	93	28	FF SP	1022	6,1–8,5
Обезжиренное молоко	88–112	68	14	RF SP	2158	3,0
	21,2–44	46	22	RF SP	988	3,0
Кукурузное масло	7,7	104	17	FF REC	1420	6,1–8,5
	50	57	19	FC	1022	—
Сахар	67	57	11	CAL	1476	0,6
	33	57	11	CAL	3407	0,6
	19	100	21	RF REC	2726	6,1
	50	43	19	RF REC	636	6,1
	39,5–67	93	22	FF SP PAN	943–477	2,4
	39,5–67	93	22	FF SP PAN	1124–676	2,4
Томатная паста	5–8,7	93	28	RF REC	1408	—
	8,7–20	77	17	FC	1022	—
	20,7–28	54	22	FC	721	—
	8	108	34	FC	3009	—
	12,5	87	18	FC	2413	—
	30	53	33	RF REC	823	—
Желатин	2,75–4	92–104	7,38–9,7	RF SP	1959–2129	6,4
	4–6,4	78–95	8,9–13,3	RF SP	852–1334	6,4
	6,4–19,5	44–52	30,6–43,3	RF SP	159–244	6,4

<sup>a</sup> Обозначения: FF — с нисходящим движением раствора и вторичного пара; RF — с восходящим движением раствора и вторичного пара, или «термосифон»; FC — с принудительной циркуляцией; SP — однопроводный; REC — с рециркуляцией; PAN — с пластинчатым теплообменником; CAL — с внутренней нагревательной камерой.

По [27].

лоотдачи со стороны жидкости. Таким образом, на практике в конструкторских расчетах применяется коэффициент теплопередачи. Значения коэффициентов теплопередачи при концентрировании жидких пищевых продуктов методом выпаривания приведены в табл. 6.3 [27].

### 6.3.2 Превышение точки кипения растворов

Факт превышения точки кипения (ПТК), вызванного содержанием в пищевых растворах нелетучих сухих веществ, следует из широко известной теории растворов.

В случае пищевых растворов ПТК может быть спрогнозировано по уравнению:

$$\Delta T_b(^{\circ}\text{K}) = -(K_v / M_w) \ln a_w, \quad (6.6)$$

где  $\Delta T_b = T - T_b$  — превышение точки кипения;  $T_b$  — температура кипения воды;  $T$  — температура кипения данной жидкости;  $K_v = 512$  кг К/кг · моль, константа ПТК;  $M_w = 18$ , молекулярная масса воды;  $a_w$  — активность воды в пищевом растворе ( $0 \leq a_w \leq 1$ ), являющаяся функцией содержания растворимых СВ.

Эмпирическая форма уравнения для ПТК растворов сахара, выраженная в виде функции от содержания СВ, может быть представлена в виде:

$$\Delta T_b(^{\circ}\text{C}) = 0,33 \exp(4X_s); (0 \leq X_s \leq 1), \quad (6.7)$$

где  $X_s$  — массовая доля СВ.

Для оценки превышения точки кипения в зависимости от содержания растворенных веществ обычно используют диаграммы Дюринга (*Duhring*), которые хорошо работают для растворов сахаров и солей [18].

### 6.3.3 Эффект загрязнения

Одной из проблем, возникающих в процессе выпаривания пищевого продукта, является загрязнение или формирование накипи в процессе теплопередачи. Загрязнение труб испарителя чувствительными к нагреву веществами пищевого продукта наблюдается в случаях, когда вязкие жидкости перегреваются в процессе движения внутри труб испарителя. Накопление денатурированного материала на поверхности труб может значительно повлиять на производительность выпарной установки и качество продукта. Влияние загрязнения на интенсивность теплопередачи с течением времени задается уравнением [14]:

$$1/U^2 = a + b\Theta, \quad (6.8)$$

где  $U$  — коэффициент теплопередачи в некоторый момент времени;  $\Theta$  — продолжительность работы, ч;  $a$  и  $b$  — константы.

Эффект загрязнения может быть выражен как термическое сопротивление вследствие загрязнения

$$R_f = \frac{1}{U} + \frac{1}{U_o}, \quad (6.9)$$

где  $R_f$  — термическое сопротивление вследствие загрязнения;  $U_o$  — коэффициент теплопередачи для чистой трубы.

## 6.4 Расчеты выпарных аппаратов (испарителей)

При конструировании и оценке выпарных аппаратов и испарителей требуется провести некоторые расчеты и анализ их производительности. Условия, при которых на

предприятиях проводится выпаривание, весьма различны. Для испарительной системы могут проводиться два вида анализов: в динамике и в устойчивом состоянии. Анализы динамики могут привести к построению моделей, предназначенных для прогнозирования работы системы в динамике в зависимости от изменений любого из эксплуатационных параметров, необходимых при работе в неустановившемся состоянии. Однако через непродолжительный период времени достигается некоторый стабильный режим работы испарителей. Когда многокорпусная установка находится в таком установившемся режиме, можно определить давление пара (и, следовательно, температуру) в первом контуре, а давление пара (и, следовательно, температура), покидающего последний контур, определяется по известной температуре охлаждающей воды. Таким образом,  $\Delta T$  практически фиксируется в заранее определенном диапазоне. Важно признать тот факт, что внешнего контроля межкорпусного распределения температуры не существует. Анализ стабильного режима работы испарителей широко используется в приведенных ниже расчетах испарителей [12, 14].

### 6.4.1 Материальный и энергетический балансы

Схема обычного однокорпусного испарителя с направлениями потоков энергии и материала приведена на рис. 6.7. Объемный расход пара и конденсата —  $V$ , кг/ч; расход подаваемого материала (жидкого сиропа) —  $F$ , кг/ч; расход концентрата (густого

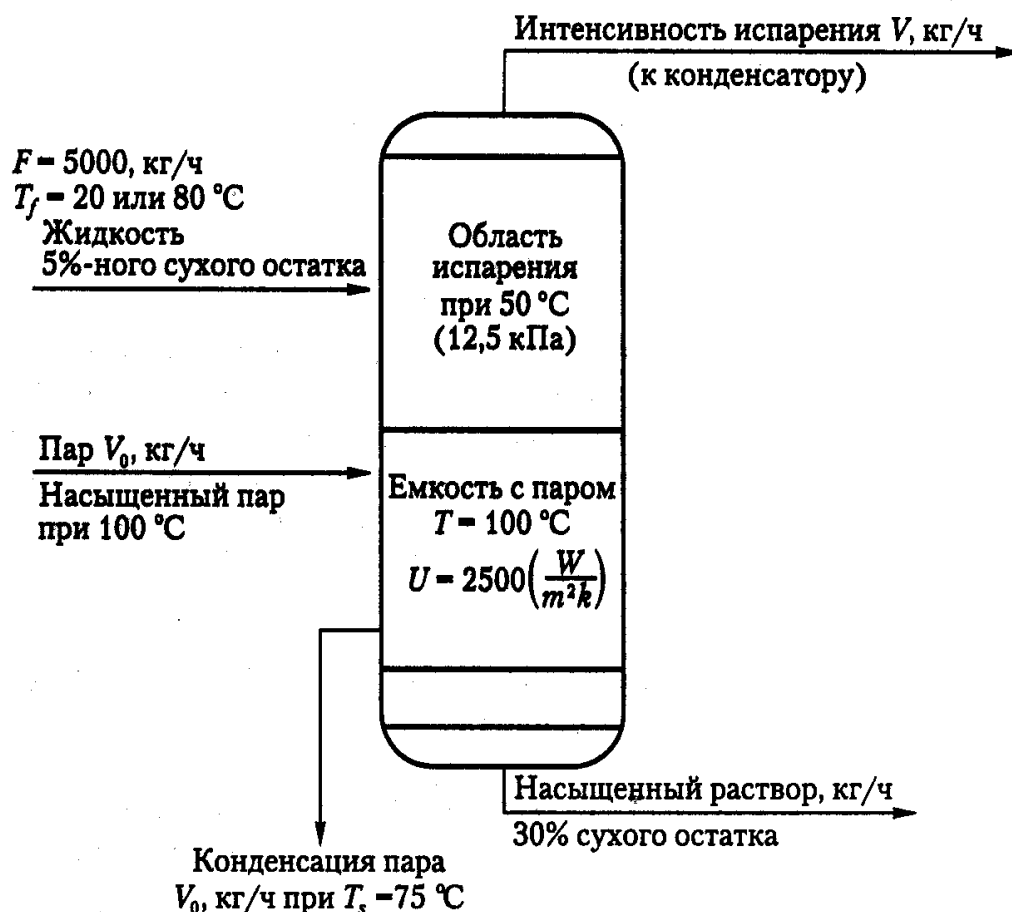


Рис. 6.7. Схема типичного одноконтурного выпарного аппарата с указанием направлений потоков материала и энергии



сиропа) —  $L$ , кг/ч. Расход пара, поступающего в конденсирующее устройство (предполагая, что из сиропа не происходит выделения, осадка твердых веществ), составляет  $V = (F - L)$  кг/ч. Обозначим  $T_s$  температуру конденсации пара,  $T$  — температуру кипения сиропа в испарителе, а  $T_f$  — температуру подаваемого материала (в °C).

Материальный и энергетический балансы для одноконтурного испарителя можно получить следующим образом. Отдельные балансы по растворенным веществам (СВ) и растворителю (вода) имеют следующий вид:

$$FX_f = LX_p \quad (6.10)$$

и

$$F(1 - X_f) = V + L(1 - X_p), \quad (6.11)$$

где  $X_f$  — массовая доля растворенного вещества в подаваемом материале;  $X_p$  — массовая доля растворенного вещества в густом сиропе.

Общий материальный баланс выражается формулой:

$$F = V + L. \quad (6.12)$$

Для любой задачи выпаривания основным является расчет расхода выпаренной влаги. Можно показать, что этот расход при концентрировании некоторого раствора от 5 до 10% СВ равен расходу при концентрировании раствора от 30 до 60%. Формула для такого расчета выводится из уравнений (6.11) и (6.12).

Расход выпаренной влаги

$$V = F(1 - X_f/X_p). \quad (6.13)$$

Расход подаваемого материала

$$F = V/(1 - X_f/X_p). \quad (6.14)$$

Количество выпаренной влаги в кг на 1000 кг подаваемого на выпаривание материала в ходе концентрирования до высокой плотности приведено в табл. 6.4.

Энергетический баланс можно записать с использованием значений скрытой теплоты испарения и удельной теплоемкости в следующем виде:

$$Q = V_o \lambda_s = (F - L)\lambda + Fc_p(T - T_f), \quad (6.15)$$

где  $V_o$  — расход пара, кг/ч;  $c_p$  — удельная теплоемкость подаваемого материала.

Таким образом, требуемый расход пара составляет:

$$V_o = (F - L)\lambda + Fc_p(T - T_f) / \lambda_s. \quad (6.16)$$

Удельный расход греющего пара ( $E$ ) равен

$$E = \text{кг выпаренной влаги/кг подаваемого пара} = V/V_o. \quad (6.17)$$

Таблица 6.4. Количество выпаренной влаги (кг/1000 кг материала)

Концентрация подаваемого сока	Концентрация сгущенного сока, % масс. растворенных СВ																
	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
1	900	917	929	938	944	950	960	967	971	975	978	980	982	983	985	986	987
2	800	833	857	875	889	900	920	933	943	950	956	960	964	967	969	971	973
3	700	750	786	813	833	850	880	900	914	925	933	940	945	950	954	957	960
4	600	667	714	750	778	800	840	867	886	900	911	920	927	933	938	943	947
5	500	583	643	688	722	750	800	833	857	875	889	900	909	917	923	929	933
6	400	500	571	625	667	700	760	800	829	850	867	880	891	900	908	914	920
7	300	417	500	563	611	650	720	767	800	825	844	860	873	883	892	900	907
8	200	333	429	500	556	600	680	733	771	800	822	840	855	867	877	886	893
9	100	250	357	438	500	550	640	700	743	775	800	820	836	850	862	871	880
10		167	286	375	444	500	600	667	714	750	778	800	818	833	846	857	867
11		83	214	313	389	450	560	633	686	725	756	780	800	817	831	843	853
12			143	250	333	400	520	600	657	700	733	760	782	800	815	829	840
13			71	188	278	350	480	567	629	675	711	740	764	783	800	814	827
14				125	222	300	440	533	600	650	689	720	745	767	785	800	813
15				63	167	250	400	500	571	625	667	700	727	750	769	786	800
16					111	200	360	467	543	600	644	680	709	733	754	771	787
17					56	150	320	433	514	575	622	660	691	717	738	757	773
18						100	280	400	486	550	600	640	673	700	723	743	760
19						50	240	367	457	525	578	620	655	683	708	729	747
20							200	333	429	500	556	600	636	667	692	714	733
21							160	300	400	475	533	580	618	650	677	700	720
22							120	267	371	450	511	560	600	633	662	686	707
23							80	233	343	425	489	540	582	617	646	671	693
24							40	200	314	400	467	520	564	600	631	657	680
25								167	286	375	444	500	545	583	615	643	667

Для проведения анализа изменений концентрации продукта под воздействием флуктуации пара или подаваемого материала уравнение (6.13) можно привести к соответствующему виду для многокорпусной установки [28]:

$$\sum V_i = F(1 - X_f/X_n), \quad (6.18)$$

где  $i = 1, 2, \dots, n$ -й корпус.

Из этого уравнения находится концентрация на выходе из  $n$ -го корпуса:

$$x_n = x_f(1 - \sum V_i / F). \quad (6.19)$$

Дифференцирование относительно  $\sum V_i / F$  дает изменение концентрации продукта относительно соотношения «пар/подаваемый материал»:

$$dX_n / d(\sum V_i / F) = X_f / (1 - \sum V_i / F)^2 = X_n^2 / X_f. \quad (6.20)$$

Уравнение (6.20) облегчает сравнение при различных эксплуатационных режимах. С помощью дополнительной формулы можно преобразовать знаменатель в дробное отношение «пар/подаваемый материал». Преобразовав уравнение 6.18, получим

$$\sum V_i / F = (X_n - X_f) / X_n. \quad (6.21)$$

Из уравнений (6.20) и (6.21) следует:

$$dX_n / [d(\sum V_i / F) / (\sum V_i / F)] = [X_n (X_n - X_f)] / X_f. \quad (6.22)$$

Данные по удельной теплоемкости растворов сахара и скрытой теплоте конденсации насыщенного пара легко доступны. Значения удельной теплоемкости апельсинового сока приведены в табл. 6.5, и их можно использовать для большинства фруктовых и овощных соков. Данные по скрытой теплоте конденсации насыщенного пара при различных температурах (по [13]) представлены в табл. 6.6.

### Пример 6.1

В выпарном аппарате производится концентрирование некоторого потока продуктов с содержанием СВ 10% до их содержания 70%. Требуется рассчитать влияние 1%-ного изменения расхода пара или подачи продукта на изменение концентрации.

Решение

$$dX_n / [d(\sum V_i / F) / \sum V_i / F] = [0,7(0,7 - 0,1) / 0,1] = 4,2.$$

Изменение на 1% как расхода пара, так и подачи продукта может вызвать отклонение концентрации продукта на  $\pm 4,2\%$  от заданных 70%.

Таблица 6.5. Удельная теплоемкость апельсинового сока в интервале температур от 0 до 80 °C

°В, %масс	Температура, °C							
	0	5	10	15	20	40	60	80
0	4,186	4,186	4,186	4,186	4,186	4,186	4,186	4,186
5	4,045	4,046	4,048	4,050	4,052	4,060	4,067	4,075
10	3,903	3,907	3,911	3,914	3,918	3,933	3,948	3,963
15	3,762	3,767	3,773	3,778	3,784	3,807	3,829	3,852
20	3,620	3,628	3,635	3,643	3,650	3,680	3,710	3,741
25	3,479	3,488	3,497	3,507	3,516	3,554	3,592	3,629
30	3,337	3,348	3,360	3,371	3,382	3,427	3,473	3,518
35	3,196	3,209	3,222	3,235	3,248	3,301	3,354	3,407
40	3,054	3,069	3,084	3,099	3,114	3,175	3,235	3,295
45	2,913	2,930	2,947	2,963	2,980	3,048	3,116	3,184
50	2,771	2,790	2,809	2,828	2,846	2,922	2,997	3,073
55	2,630	2,650	2,871	2,692	2,713	2,795	2,878	2,961
60	2,488	2,511	2,533	2,556	2,579	2,669	2,759	2,850
65	2,347	2,371	2,396	2,420	2,445	2,543	2,641	2,738

Таблица 6.6. Скрытая теплота конденсации насыщенного пара

Температура, °С	Давление пара, кПа	Скрытая теплота, кДж/кг	Температура, °С	Давление пара, кПа	Скрытая теплота, кДж/кг
10	1,2	2477,8	100	101,3	2257,1
12	1,3	2473,1	102	108,7	2251,8
14	1,5	2468,4	104	116,6	2246,5
16	1,7	2463,7	106	125,0	2241,1
18	2,0	2458,9	108	133,9	2235,7
20	2,3	2454,2	110	143,3	2230,3
22	2,6	2449,5	112	153,2	2224,8
24	3,0	2444,8	114	163,6	2219,4
26	3,4	2440,0	116	174,7	2213,8
28	3,8	2435,3	118	186,3	2208,3
30	4,3	2430,5	120	198,6	2197,1
32	4,8	2425,8	122	211,5	2191,4
34	5,4	2421,0	124	225,1	2185,7
36	6,0	2416,3	126	239,4	2180,0
38	6,7	2411,5	128	254,4	2174,2
40	7,5	2406,7	130	270,2	2168,4
42	8,3	2402,0	132	286,7	2162,6
44	9,2	2397,2	134	304,1	2156,7
46	10,2	2392,4	136	322,3	2150,8
48	11,3	2387,5	138	341,4	2144,8
50	12,5	2382,7	140	361,4	2138,8
52	13,7	2377,9	142	382,3	2132,7
54	15,1	2373,1	144	404,1	2126,6
56	16,6	2368,2	146	427,0	2120,5
58	18,2	2363,3	148	450,9	2114,3
60	20,0	2358,4	150	475,9	2197,1
62	21,9	2353,6	152	501,9	2108,0
64	24,0	2348,6	154	529,1	2101,7
66	26,2	2343,7	156	557,4	2195,4
68	28,6	2338,8	158	586,9	2089,0
70	31,2	2333,8	160	617,7	2082,6
72	34,0	2328,9	162	649,8	2076,1
74	37,0	2323,9	164	683,1	2069,5
76	40,2	2318,9	166	717,9	2062,9
78	43,6	2313,8	168	754,0	2056,2
80	47,3	2308,8	170	791,5	2049,5
82	51,3	2303,7	172	830,5	2042,7
84	55,5	2298,6	174	871,1	2035,9
86	60,1	2293,5	176	913,2	2029,0
88	64,9	2288,4	178	956,9	2022,1
90	70,0	2283,2	180	1002,2	2015,1
92	75,5	2278,1	182	1049,2	2008,0
94	81,4	2272,9	184	1098,0	2000,8
96	87,6	2267,6	186	1148,6	1993,6
98	94,2	2264,4	188	1200,9	1986,4

## 6.4.2 Зависимость «температура–время»

Для предотвращения ухудшения качества чувствительных к тепловому воздействию материалов общепризнанным считается, что важнее всего низкие рабочие температуры и непродолжительное время обработки. Время обработки в любом выпарном аппарате может быть рассчитано из приведенного ниже уравнения [19]:

$$F_f = 1 - \exp(-\theta/r), \quad (6.23)$$

где  $F_f$  — выпаренная влага в долях от подаваемого материала;  $\theta$  — время обработки;  $r$  — отношение удерживаемого объема к объемному расходу выгружаемого готового продукта.

Общепризнано, что в соотношении «температура–время» временной фактор более важен, чем значение температуры. Если прежде упор делался на поддержание в выпарных аппаратах низких рабочих температур, то постепенно внимание стало уделяться более тщательному контролю продолжительности обработки при относительно более высоких рабочих температурах [4, 8]. Это положительно сказалось не только на качестве продукта, но и на снижении размеров инвестиций и эксплуатационных расходов.

## 6.4.3 Выпарной аппарат однократного выпаривания

Один из простейших испарителей представляет собой котел с паровой рубашкой, у которого вывод вторичного пара соединен с конденсирующим агрегатом (с вакуумным оборудованием или без него). Применение таких выпарных аппаратов ограничивается системами периодической или полупериодической работы с вязкими продуктами (например, джемами, желе и различными сиропами). Тем не менее даже при работе с ними такие аппараты постепенно вытесняются однокорпусными выпарными аппаратами непрерывного действия.

### Пример 6.2

В выпарном аппарате однократного выпаривания требуется выполнить предварительное концентрирование сахаросодержащего раствора от содержания СВ 5% до 30% (см. рис. 6.7). Давление пара равно атмосферному (100 °С). В паровом пространстве требуется поддерживать разрежение в 12,5 кПа, что соответствует давлению пара при температуре 50 °С. Подача материала в выпарной аппарат составляет 5000 кг/ч. Сконцентрированный материал выходит из выпарного аппарата при температуре 75 °С, а незначительным превышением точки кипения можно пренебречь. Необходимо рассчитать потребный расход пара и паропроизводительность при температуре подаваемого материала (а) 20 °С и (б) 80 °С.

Раствор

а) Исходный раствор поступает при температуре 20 °С. Материальный баланс выражается следующей формулой:

$$\text{Производительность по испаренной влаге} = 5000 (1 - 0,05/0,30) = 4166,7 \text{ кг/ч.}$$

Из таблицы 6.6 имеем:

$$\lambda_s = 2257,1 \text{ кДж/кг при } 100 \text{ °С;}$$

$$\lambda = 2382,7 \text{ кДж/кг при } 50 \text{ °С.}$$

Удельная теплоемкость сахаросодержащих растворов может быть вычислена из уравнения (6.1) или таблицы 6.5

$$c_p = 4,05 \text{ кДж/кг}^\circ\text{С}.$$

Тепловой баланс имеет вид:

$$2257,1 V_o = 4166,7 \cdot 2382,7 + 5000 \cdot 4,05 (50 - 20).$$

Требуемый расход пара равен

$$V_o = 4667,3 \text{ кг пара/ч.}$$

Паропроизводительность равна:

$$E = V/V_o = 4166,7/4667,3 = 0,89 \text{ кг выпаренной воды/кг пара.}$$

б) Исходный раствор поступает при температуре  $80^\circ\text{С}$ . Материальный баланс не меняется. Тепловой баланс имеет вид:

$$2257,1 V_o = 4166,7 \cdot 2382,7 + 5000 \cdot 4,05(50 - 20).$$

Требуемый расход пара равен:

$$V_o = 4129 \text{ кг пара/ч.}$$

Паропроизводительность равна:

$$E = V/V_o = 4166,7/4129 = 1,01 \text{ кг выпаренной воды/кг пара.}$$

#### Анализ

В случае а) температура подаваемого в аппарат слабого раствора меньше, чем температура кипения, так что часть энергии пара используется на нагрев подаваемого материала до температуры кипения. Это количество теплоты является тепловой нагрузкой. В случае б) температура подаваемого материала выше температуры кипения, и требования к пару меньше, так как некоторое количество теплоты привносится с подаваемым материалом. Это количество теплоты обеспечивает мгновенное испарение.

#### Пример 6.3

Требуется рассчитать площадь греющей поверхности для примера 6.2, если коэффициент теплопередачи принимается равным  $3000 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{С)}$ .

#### Решение

Площадь греющей поверхности рассчитывается с помощью уравнения (6.2):

$$A = Q/U\Delta T = 2257,1 \cdot 4667,3/[3000(100 - 50)];$$

$$\text{а) } A = 2257,1 \cdot 4667,3/[3000(100 - 50)] = 70,2 \text{ м}^2;$$

$$\text{б) } A = 2257,1 \cdot 4129/[3000(100 - 50)] = 62,1 \text{ м}^2.$$

#### Анализ

При использовании данного уравнения возникает проблема выбора значения  $\Delta T$ . В примере 6.2 пар конденсируется при  $100^\circ\text{С}$ , а конденсат покидает аппарат при  $75^\circ\text{С}$ . Жидкость подается при температуре  $20^\circ\text{С}$  и предварительно нагревается до точки кипения на  $50^\circ\text{С}$ . Значения теплоты составляют  $2257,1 \text{ кДж/кг}$  при конденсации при  $100^\circ\text{С}$  и  $4,187 \cdot (100 - 75) \text{ кДж/кг}$  — при охлаждении до  $75^\circ\text{С}$ . Теплота, освобождающаяся при конденсации, настолько велика по сравнению с количеством теплоты, выделяющейся при охлаждении конденсата, что при расчете перепада температур значением последнего обычно пренебрегают. При конструировании выпарных аппаратов площади поверхности теплопередачи рассчитывают с использованием разницы температур между конденсирующимся паром и кипящей жидкостью.

### 6.4.4 Многокорпусные выпарные установки

Многокорпусные выпарные установки можно эксплуатировать с применением прямоточной и смешанной схемы соединения корпусов. Сравнение различных систем подачи проведено в работе [9].

Схема простой трехкорпусной установки прямоточного типа приведена на рис. 6.8. Поток вторичного пара, отделяемый в первом корпусе, соотносится с потоком греющего пара, подаваемого в первый корпус, и с паропроизводительностью  $E$ :

$$V_1 \Delta H_1 = EV_0 \Delta H_0. \quad (6.24)$$

Аналогично, вторичный пар, удаляемый из второго корпуса, соотносится с расходом греющего пара в первом корпусе

$$V_2 \Delta H_2 = EV_1 \Delta H_1 = E^2 V_0 \Delta H_0. \quad (6.25)$$

Такая последовательность может быть продолжена для  $n$ -ного корпуса, и отдельные потоки пара суммируются:

$$\sum V_i = V_0 \Delta H_0 \left[ E / \Delta H_1 + E^2 / \Delta H_1 + \dots + E^n / \Delta H_n \right]. \quad (6.26)$$

Уравнение (6.26) можно использовать для расчета соотношений «вторичный пар/греющий пар» относительно количества корпусов при данном значении  $E$  и заданных давлениях и температурах [28].

Энтальпия  $\Delta H_i$ , полученная при кипении испаряющегося материала в данном корпусе, не является в точности равной скрытой теплоте испарения. В установке прямоточного типа раствор, поступающий из предыдущего корпуса, из-за уменьшения давления будет иметь температуру выше его точки кипения. Тем не менее пар, получаемый в каждом корпусе, является перегретым из-за повышения температуры

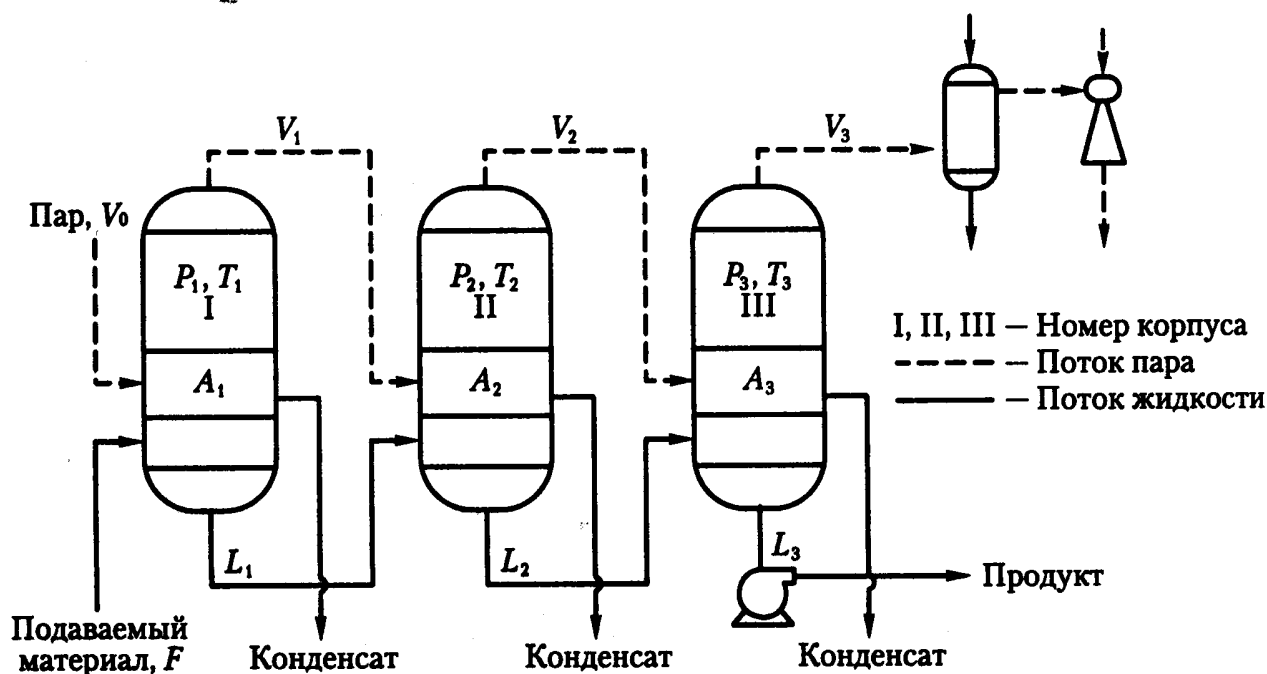


Рис. 6.8. Схема прямоточной трехкорпусной выпарной установки

кипения с увеличением давления. С точки зрения теплового баланса этими факторами обычно пренебрегают. Если для каждого  $\Delta H_i$  из уравнения (6.26) используется скрытая теплота, соотношение «вторичный пар/греющий пар» можно рассчитать для любого выпарного аппарата.

#### Пример 6.4

Требуется рассчитать соотношение «вторичный пар/греющий пар» для трехкорпусной установки с перепадом температур от 25 до 100 °С, начиная с 25 °С в последнем корпусе, принимая перепад температур для каждого корпуса равным 25 °С и  $E = 0,95$ .

*Решение*

Из табл. 6.6

$$\lambda_0 = 2257,1;$$

$$\lambda_1 = 2285,8;$$

$$\lambda_2 = 2382,7;$$

$$\lambda_3 = 2442,4.$$

Соотношение «вторичный пар/греющий пар» для трехкорпусной установки в терминах скрытой теплоты испарения выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \sum V_i / V_0 &= \lambda_0 [E / \lambda_1 + E^2 / \lambda_2 + E^3 / \lambda_3] = \\ &= 2277,1 [0,92 / 2285,8 + 0,92^2 / 2382,7 + 0,92^3 / 2442,4] = 2,43. \end{aligned}$$

Расчеты из примера 6.2 показывают, что имеются 3 источника теплоты, которая может быть повторно использована или регенерирована для улучшения энергетической эффективности. Пар может быть повторно использован для подогрева жидкости при более низкой температуре кипения в условиях частичного разрежения. Подаваемый материал может быть предварительно подогрет в промежуточном подогревателе. Тепловая энергия конденсата может быть регенерирована путем мгновенного перехода на более низкую температуру. Эти потенциальные запасы энергии были введены в конструкторские расчеты современных многокорпусных выпарных установок [4].

Для чувствительных к тепловому воздействию пищевых продуктов применяют в основном прямоточные установки. В них материал вводится в первый корпус и течет в следующий корпус параллельно потоку пара. При таком способе эксплуатации обычно бывает необходим предварительный подогрев и большее разрежение в последнем корпусе, поскольку температура в последнем корпусе является самой низкой в системе.

При работе по противоточной схеме материал вводится в последний корпус, а отводится из первого, где достигается наиболее высокая температура испарения. Такая установка обычно используется при работе с вязкими жидкими продуктами или там, где требуется применение специальных вкусовых добавок (как при работе с томатной пастой).

#### Пример 6.5. Расчет механической компрессии

В однокорпусном выпарном аппарате желательно увеличивать теплопроизводительность пара путем его механической компрессии (рис. 6.9), то есть концентрируя сахаросодержащие растворы с 10%-ного содержания СВ до 55%.



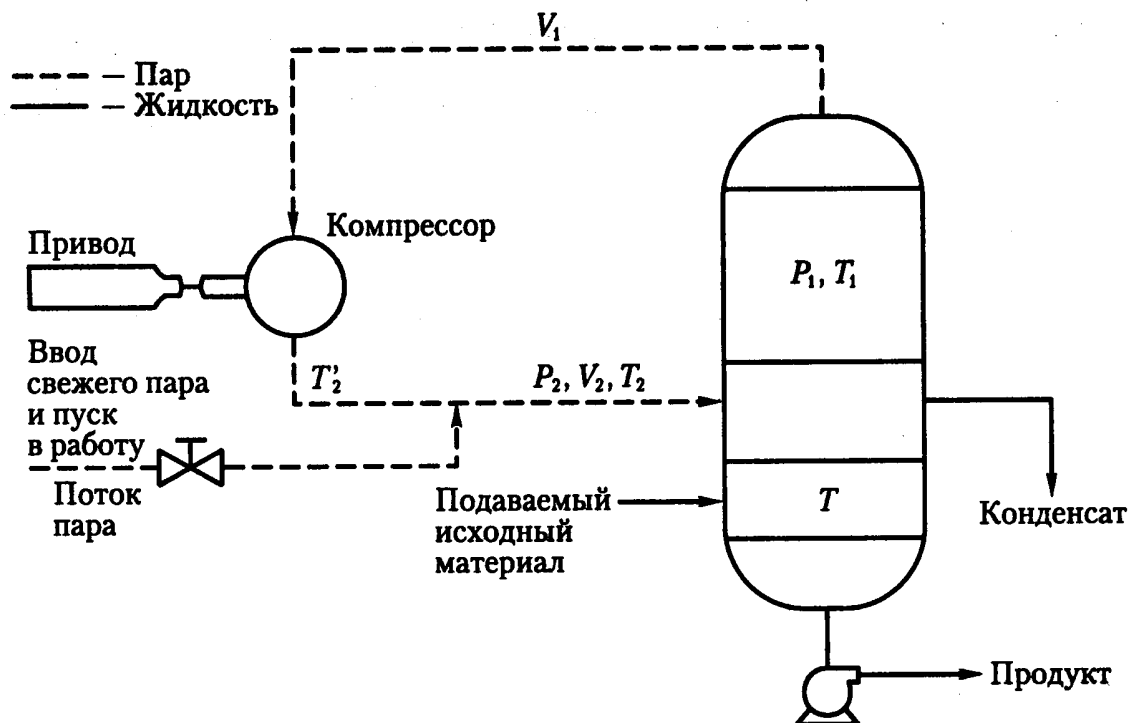


Рис. 6.9. Схема однокорпусного выпарного аппарата с механической компрессией

Дано:

Расход исходного материала:  $F = 5040$  кг/ч.

Расход готового продукта:  $F_1 = 2240$  кг/ч.

$c_{pf} = 3,95$  кДж/кг $^{\circ}$ С.

$c_{p1} = 2,78$  кДж/кг $^{\circ}$ С (табл. 6.5).

Расход вторичного пара из испарителя

$$V_1 = 2800 \text{ кг/ч}; \quad T_f = 100^{\circ}\text{C}; \quad P_1 = 101,3 \text{ кПа.}$$

Требуется повысить его давление до  $P_2 = 150$  кПа. Если для использования в качестве свежего пара доступен насыщенный пар температурой  $120^{\circ}\text{C}$  (КПД компрессии предполагается равным 78%), необходимо рассчитать: а) работу по компрессии; б) требуемый расход свежего пара.

Решение

Пар, сжатый до высокого давления, становится перегретым. Теоретически при постоянной энтропии пара  $S$  количество энергии, требуемой для его компрессии, равно разности энтальпий  $H$  в точках всасывания и выпуска.

Изменение энтропии для изэнтропической компрессии может быть получено из таблицы парообразования [13]

$$H_1 = 3676 \text{ кДж/кг (для насыщенного пара при } 100^{\circ}\text{C);}$$

$$S_1 = S_2 = 7,355 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K);}$$

$$H_2 = 2744 \text{ кДж/кг (по таблицам для перегретого пара для } S_2).$$

Количество энергии на 1 кг пара, требуемое для компрессии, равно

$$W = (H_2 - H_1)/0,78 = (2744 - 2676)/0,78 = 87,18 \text{ кДж/кг.}$$

а) Работа компрессии  $= (87,18 \text{ кДж/кг})(2800 \text{ кг/ч}) = 2,441 \cdot 10^5 \text{ кДж/ч}$ . Общий тепловой баланс в выпарном аппарате имеет вид:

$$F c_{pf} (T_f - 0) + V_s H_s + W V_1 = F_1 c_{p1} (T_1 - 0) + (V_s + V_1) h_c,$$

где  $V_s$  — расход свежего пара;  $H_s$  — энтальпия насыщенного отделенного пара;  $h_c$  — энтальпия парового конденсата.

б) Требуется расход свежего пара  $V_s = 69$  кг/ч.

## 6.5 Эксплуатационная оценка промышленного выпарного аппарата для работы с цитрусовыми

Концентрирование цитрусовых соков представляет собой типичный пример применения выпарных аппаратов в пищевой промышленности. В промышленных условиях средний выход апельсинового сока варьируется от 43 до 55%, а содержание СВ — от 9 до 15%, и сок концентрируют до 60–65% выпариванием. Наиболее распространенные конструкции испарителей для цитрусовых известны под названием *TASTE*, причем имеются сведения о проверке их эксплуатационных характеристик (см., например, [4]). Материальный и тепловой балансы промышленных установок для цитрусовых достаточно сложны<sup>1</sup>. Во многих случаях необходимая для конструирования информация бывает неполной, в связи с чем для оценки эксплуатационных характеристик необходимо получать дополнительные оценки тепловых и материальных балансов.

### Пример 6.6. Оценка эксплуатационных характеристик промышленного выпарного аппарата для цитрусовых

Схема типовой установки *TASTE* (четырёхкорпусной, семиступенчатой, сконструированной на производительность выпаривания 18 144 кг/ч и усовершенствованной до 5 корпусов и 8 ступеней), приведена на рис. 6.10. Для многокорпусных выпарных установок анализ может быть проведен путем расчета теплового баланса в каждом корпусе по отдельности, а материального баланса — во всей системе целиком. Считается, что можно пренебречь потерями теплоты в атмосферу и потерями энергии, возникающими из-за отвода пара для удаления неконденсирующихся газов. Из рис. 6.10 уравнения материального и теплового баланса можно записать в терминах удельной теплоемкости и скрытой теплоты испарения следующим образом:

1-й корпус, вторая ступень

Тепловой баланс

$$V_0\lambda_0 - Q_6 + F_1C_1(T_{f6} - T_2) = V_2\lambda_2; \quad (6.27a)$$

$$Q_6 = F_1C_1(T_{f6} - T_{f5}). \quad (6.27б)$$

Материальный баланс

$$V_2 = F_1(1 - X_1/X_2). \quad (6.27в)$$

Коэффициенты теплопередачи

— для испарения

$$U_2 = (V_0H_0 - Q_6) / [A_2(T_s - T_2 - B_2)]. \quad (6.27г)$$

— для предварительного подогревателя (№ 6)

$$U_6^* = Q_6 / (A_6^* \times LMTD). \quad (6.27д)$$

<sup>1</sup> Материальные и тепловые балансы многокорпусных выпарных установок не столько сложны, сколько могут быть довольно громоздкими.

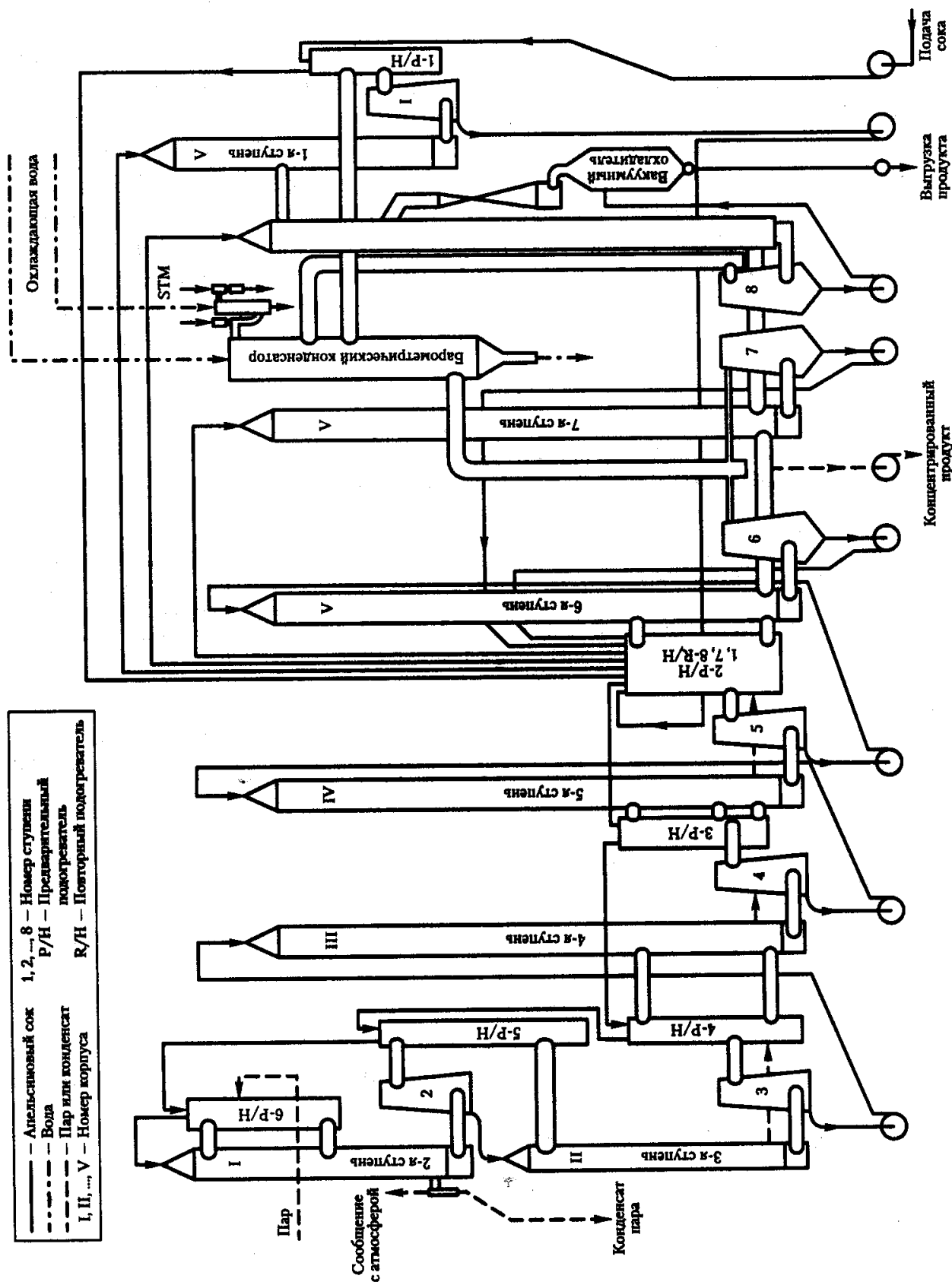


Рис 6.10. Схема типовой пятикорпусной восьмиступенчатой выпарной установки для цитрусовых системы TASTE производства Gulf Machinery Corp, г. Дьюнден, штат Флорида, США. По [21]

2-й корпус, 3-я ступень  
Тепловой баланс

$$V_2\lambda_2 = Q_5(F_1 - V_2)C_2(T_2 - T_3) = V_3\lambda_3; \quad (6.28a)$$

$$Q_5 = F_1C_1(T_{f5} - T_{f4}). \quad (6.28б)$$

Материальный баланс

$$V_3 = (F_1 - V_2)(1 - X_2/X_3). \quad (6.28в)$$

Коэффициенты теплопередачи  
- для выпарного аппарата

$$U_3 = (V_2H_2 - Q_5)/[A_3(T_2 - T_3 - B_3)]; \quad (6.28г)$$

- для предварительного подогревателя (№ 5)

$$U_5^* = Q_5/(A_5^* \times LMTD). \quad (6.28д)$$

3-й корпус, 4-я ступень  
Тепловой баланс

$$V_3\lambda_3 = Q_4 + (F_1 - V_2 - V_3)C_3(T_3 - T_4) + V_2C(T_3 - T_4) = V_4\lambda_4; \quad (6.29a)$$

$$Q_4 = F_1C_1(T_{f4} - T_{f3}). \quad (6.29б)$$

Материальный баланс

$$V_4 = (F_1 - V_2 - V_3)(1 - X_3/X_4). \quad (6.29в)$$

Коэффициенты теплопередачи  
- для выпарного аппарата

$$U_4 = (V_3H_3 - Q_4)/[A_4(T_3 - T_4 - B_4)]; \quad (6.29г)$$

- для предварительного подогревателя (№ 4)

$$U_4^* = Q_4/(A_4^* \times LMTD). \quad (6.29д)$$

4-й корпус, 5-я ступень  
Тепловой баланс

$$V_4\lambda_4 - Q_3 + (F_1 - V_2 - V_3 - V_4)C_4(T_4 - T_5) + (V_2 + V_3)C(T_4 - T_5) = V_5\lambda_5; \quad (6.30a)$$

$$Q_3 = F_1C_1(T_{f3} - T_{f2}). \quad (6.30б)$$

Материальный баланс

$$V_5 = (F_1 - V_2 - V_3 - V_4)(1 - X_4/X_5). \quad (6.30в)$$

Коэффициенты теплопередачи

– для выпарного аппарата

$$U_5 = (V_4 H_4 - Q_3) / [A_5 (T_4 - T_5 - B_5)]; \quad (6.30г)$$

– для предварительного подогревателя (№ 3)

$$U_3^* = Q_3 / (A_3^* \times LMTD). \quad (6.30д)$$

5-й корпус, 6-я ступень

Тепловой баланс

$$M_1 + V_5 \lambda_5 - Q_2 - Q_{r1} - Q_{r8} + (F_1 - V_2 - V_3 - V_4 - V_5) C_5 (T_5 - T_6) + \\ + (V_2 + V_3 + V_4) C (T_5 - T_6) = V_6 \lambda_6; \quad (6.31а)$$

$$Q_2 = F_1 C_1 (T_{f2} - T_{r1}); \quad (6.31б)$$

$$Q_{r1} = F_o C_o (T_{r1} - T_{f1}); \quad (6.31в)$$

$$Q_{r7} = (F_1 - V_2 - V_3 - V_4 - V_5 - V_6) C_6 (T_6 - T_{r7}); \quad (6.31г)$$

$$Q_{r8} = (F_1 - V_2 - V_3 - V_4 - V_5 - V_6 - V_7) C_7 (T_7 - T_{r8}). \quad (6.31д)$$

Материальный баланс

$$V_6 = (F_1 - V_2 - V_3 - V_4 - V_5) (1 - X_5 / X_6). \quad (6.31е)$$

Коэффициенты теплопередачи

– для выпарного аппарата

$$U_6 = (M_1 V_5 \lambda_5 - Q_2 - Q_{r1} - Q_{r7} - Q_{r8}) / [A_6 (T_5 - T_6 - B_6)]; \quad (6.31ж)$$

– для предварительного подогревателя (№ 2)

$$U_2^* = Q_2 / (A_2^* \times LMTD); \quad (6.31з)$$

– для предварительного подогревателя 1-й ступени

$$U_1^* = Q_{r1} / (A_1^* \times LMTD); \quad (6.31и)$$

– для предварительного подогревателя 7-й ступени

$$U_7^* = Q_{r7} / (A_7^* \times LMTD); \quad (6.31к)$$

– для предварительного подогревателя 8-й ступени

$$U_8^* = Q_{r8} / (A_8^* \times LMTD). \quad (6.31л)$$

5-й корпус, 7-я ступень  
Тепловой баланс

$$M_2 + V_5 \lambda_5 + (F_1 - V_2 - V_3 - V_4 - V - V_6) C_6 (T_{r7} - T_7) = V_7 \lambda_7. \quad (6.32a)$$

Материальный баланс

$$V_7 = (F_1 - V_2 - V_3 - V_4 - V_5 - V_6)(1 - X_6 / X_7). \quad (6.32б)$$

Коэффициент теплопередачи  
– для выпарного аппарата

$$U_7 = M_2 V_5 \lambda_5 / [A_7 (T_5 - T_7 - B_7)]. \quad (6.32в)$$

5-й корпус, 8-я ступень  
Тепловой баланс

$$M_3 + V_5 \lambda_5 + (F_1 - V_2 - V_3 - V_4 - V - V_6 - V_7) C_7 (T_{r8} - T_8) = V_8 \lambda_8. \quad (6.33a)$$

Материальный баланс

$$V_8 = (F_1 - V_2 - V_3 - V_4 - V_5 - V_6 - V_7)(1 - X_7 / X_8). \quad (6.33б)$$

Коэффициент теплопередачи  
– для выпарного аппарата

$$U_8 = M_3 V_5 \lambda_5 / [A_8 (T_5 - T_8 - B_8)]. \quad (6.33в)$$

5-й корпус, 1-я ступень  
Тепловой баланс

$$M_4 + V_4 \lambda_5 + F_o C_o (T_{r1} - T_1) = V_1 \lambda_1. \quad (6.34a)$$

Материальный баланс

$$V_1 = F_o (1 - X_o / X_1) = F_o - F_1; \quad (6.34б)$$

$$M_1 + M_2 + M_3 + M_4 = 1. \quad (6.34в)$$

Коэффициент теплопередачи  
– для выпарного аппарата

$$U_1 = M_4 V_5 \lambda_5 / [A_1 (T_5 - T_1 - B_1)]. \quad (6.34г)$$

Регенерация теплоты на выходе продукта из 5-го корпуса

$$Q_1 = F_o C_o (T_{f1} - T_{fo}). \quad (6.35a)$$

Коэффициент теплопередачи  
– для предварительного подогревателя (№ 1)

$$U_1^* = Q_1 / (A_1^* \times LMTD). \quad (6.35б)$$

Таблица 6.7. Материальные и тепловые балансы пятиконтурной восьмиступенчатой выпарной установки для цитрусовых TASTE

Эксплуатационные характеристики	Ступень								
	1	2	3	4	5	6	7	8	P/O
Расход пара, кг/ч	4792								
Расход подаваемого материала, кг/ч	22122								
Температура пара, °C	47,7	100,0	88,2	78,3	68,2	47,7	47,7	47,7	
Температура материала на входе, °C	46,7	96,4	88,9	79,1	69,3	49,9	44,5	43,3	39,4
Температура материала на выходе, °C	43,3	88,9	79,1	69,3	49,9	41,3	39,4	39,4	15,6
ПТК, °C	0,6	0,6	0,8	1,1	2,3	2,9	3,3	3,7	4,0
Скрытая теплота испарения, кДж/кг	2391	2283	2306	2329	2375	2396	2400	2400	2459
Удельная теплоемкость, кДж/(кг · °C)	3,98	3,94	3,88	3,78	3,62	3,19	3,03	2,96	2,86
Расход концентрата на выходе, кг/ч	20042	16232	12624	9116	5619	5002	4730	4468	4344
Расход пара, кг/ч	2080	3809	3608	3508	3497	617	271	262	124
Градусы Брикса (расч.), °B	13,5	16,6	21,4	29,6	48,0	54,0	57,1	60,4	62,1
Градусы Брикса (эксп.), °B	13,2		21,5	29,9	48,2	53,7	56,8	60,4	
Тепловой баланс:									
количество подведенной теплоты, кДж/кг	1326	3005	2440	2377	2482	784	163	163	
теплота подогрева, кДж/кг	257,0	279,0	277,0	213,0	328,0	79,0	0,0		
количество полезно использованной теплоты, кДж/кг	81,0	166,0	172,0	129,0	178,0	43,0	21,0	15,0	
тепловые потери, %	2,0	15,8	1,0	1,0	1,0	2,0	2,0	2,0	
теплота на испарения, кДж/кг	1381	2416	2311	2269	2307	411	181	175	
теплотопередача, кДж/кг	1300	2250	2139	2140	2129	368	160	160	
Выпарной аппарат:									
ΔT, °C	4,3	11,1	9,2	8,9	18,3	6,4	8,2	8,2	
площадь, м²	132,8	119,9	132,8	149,9	149,9	107,5	65,2	33,5	

Таблица 6.7. (Окончание)

Эксплуатационные характеристики	Ступень							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$U, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	2262	1690	1759	1598	775	536	298	580
тепловой поток, $\text{Вт}/\text{м}^2$	9803	18785	16128	14299	14224	3425	2450	4771
выпаривание, %	11,8	21,6	20,4	19,9	19,8	3,5	1,5	1,5
количество подогревателей или повторных подогревателей, шт.	1	6	5	4	3	2	П/Н 1	П/Н 8
температура сока на выходе, $^\circ\text{C}$	34,7	96,4	83,8	71,3	61,7	46,9	46,7	43,3
температура сока на входе, $^\circ\text{C}$	24,2	83,8	71,3	61,7	46,9	43,3	34,7	39,4
температура подогревателя, $^\circ\text{C}$	9,0	8,3	9,3	11,1	12,5	2,1	4,7	6,1
площадь поверхности подогревателя, $\text{м}^2$	9,1	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	9,1	6,8
коэффициент теплопередачи подогревателя, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	3805	2453	3356	4850	6927	3675	3139	4276

Примечание: Материал — апельсиновый сок; подаваемый материал = 12,2 т/ч; продукт 60,4 т/ч; расход продукта — 44,68 кг/ч; СВ продукта — 2699 кг/ч; производительность по испаренной влаге — 7654 кг/ч; паропронизводительность — 3,68 кг испаренной влаги/кг пара; потребность в тепловой энергии — 613 кДж/кг воды. По [5].



## Общий материальный баланс

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_8. \quad (6.36)$$

## Требование к подаваемому материалу

$$F_o = V / (1 - X_o / X_8). \quad (6.37)$$

## Вакуумный охладитель

$$V_o = (F_o - V)C_8(T_9 - T_8) / \lambda_9. \quad (6.38)$$

Вышеуказанные формулы были использованы для расчета материального и теплового баланса.

*Расчет*

Для расчета материального и теплового балансов имеется 50 переменных и 27 уравнений, причем для решения промежуточных уравнений, позволяющих получить оставшиеся, следует определить 23 переменных. Для определения коэффициентов теплопередачи имеется 17 переменных и 17 уравнений.

Для расчетов измеряются и используются следующие 23 переменные:  $T_s, T_{r1}, T_{fo}, T_{r7}, T_{r8}, T_{f1} - T_{f6}, T_1 - T_8, V_o, F_o, X_o$  и  $X_8$ . Еще 7 переменных ( $X_3 - X_7, X_9, T_9$ ) измеряют и применяют для оценки энергопотерь и проверки адекватности полученных в результате расчетов результатов.

Скрытая теплота испарения рассчитывается по таблице пара с помощью следующего уравнения:

$$\lambda = 2499 \exp(-0,001016 T). \quad (6.39)$$

Удельная теплоемкость рассчитывается по уравнению (6.1):

$$C = C_p = 4,187 \{1 - X_s [0,57 - 0,0018(T - 20)]\}. \quad (6.40)$$

Повышение точки кипения рассчитывается из эмпирического уравнения ПТК для растворов сахарозы:

$$B = 0,33 \exp(4X_s). \quad (6.41)$$

Значение  $X_s$  представляет собой массовую долю растворимых СВ, а  $T$  и  $B$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) из уравнений (6.39)–(6.41).

Ожидаемая паропроизводительность была рассчитана по измеренному температурному профилю и данным по содержанию растворимых веществ (по Бриксу), исходя из предположения, что отсутствуют потери теплоты. Действительная экономия пара была рассчитана по измеренному расходу пара. Разница между двумя методами расчета была отнесена к суммарным теплопотерям.

Экспериментальные результаты, полученные в ходе эксплуатации установки, и анализ материального и теплового балансов для пятикорпусной восьмиступенчатой выпарной установки *TASTE* приведены в табл. 6.7. Данная установка представляла собой старую конструкцию выпарного аппарата *TASTE* для цитрусовых. При проектной производительности испарения паропроизводительность была равна 0,74  $N$ , где  $N$  — количество корпусов. Существенные энергопотери (в %), как выяснилось, имели место из-за подсоса воздуха и/или из-за избыточного сброса пара в атмосферу. Таким образом, представляется важным поддерживать герметичность многокорпусных систем с высоким разрежением и избегать избыточных сбросов пара в атмосферу.

Паропроизводительность аналогичных систем *TASTE* и сравнимых пластинчатых испарителей новой конструкции для цитрусовых составила соответственно 0,85  $N$  и 0,82  $N$  [11].

## 6.6 Экономические аспекты

Выпаривание представляет собой затратный вид процесса с высоким энергопотреблением. Когда энергия стоила дешево, основной критерий выбора тех или иных установок основывался на низкой стоимости затрат на оборудование, но за прошедшие два десятилетия стоимость энергии по сравнению с ними значительно возросла. В настоящее время в технологических операциях выпаривания затраты на энергию составляют наибольшую часть затрат [30], и поэтому в новых установках наиболее предпочтительны решения, позволяющие экономить энергию.

### 6.6.1 Оптимизация затрат

Общие затраты на многокорпусную выпарную установку обычно зависят от площади поверхности теплопередачи в степени  $m$  [15]:

$$\text{общие затраты} = K(A_1^m + A_2^m + \dots + A_N^m), \quad (6.42)$$

где  $A$  — площадь теплопередающих поверхностей испарителя;  $m$  — константа, зависящая от типа испарителя (обычно  $m < 1$ );  $K$  — затраты на единицу общей площади установки.

Расчет оптимального количества корпусов подразумевает нахождение компромисса между эксплуатационными и капитальными затратами. Эксплуатационные затраты включают в себя затраты на греющий пар и обслуживание. Капитальные затраты — это первоначальные затраты на оборудование и амортизационные издержки.

Если площадь теплопередающих поверхностей одинакова у всех корпусов, то для оценки оптимального количества корпусов можно использовать нижеприведенное упрощенное выражение:

$$\text{затраты на пар} = C_s V_T / NE; \quad (6.43)$$

$$\text{фиксированные затраты} = C_e N A^m; \quad (6.44)$$

$$\text{общие затраты} = \frac{C_s V_T}{NE} + C_e N A^m, \quad (6.45)$$

где  $C_s$  — стоимость 1 кг греющего пара;  $V_T$  — общее количество кг пара;  $N$  — количество корпусов;  $E$  — паропроизводительность;  $C_e$  — стоимость выпарного аппарата;  $V_s$  — количество кг острого пара.

Продифференцировав уравнение (6.44) и приравняв его к нулю, получаем оптимальное количество корпусов ( $N_{\text{опт}}$ ):

$$N_{\text{опт}} = \left[ (C_s / C_e) (V_s / A^m) \right]^{1/2}. \quad (6.46)$$

В общем случае оптимальное количество контуров увеличивается с ростом затрат на пар, коэффициентов теплопередачи и разницы температур, и уменьшается с

ростом затрат на оборудование. Вышеприведенное уравнение непригодно в тех случаях, когда площади теплопередающих поверхностей неодинаковы. В результате определение оптимального количества корпусов  $N_{\text{опт}}$  становится проблемой оптимизации. При расчете фиксированных затрат следует учитывать и другие факторы — например, амортизацию и процентные ставки. При определении затрат на пар следует учитывать также применяемый тип подачи (предполагается, например, что паропроизводительность прямоточной установки на 10% ниже, чем противоточной).

Пар, применяемый в процессе выпаривания, предварительно генерируется с помощью природного газа или жидкого топлива. Затраты на пар увеличивается с ростом цен на топливо [25].

### Пример 6.7. Расчет стоимости пара

Затраты на подогрев — базовые и предполагаемые.

Бойлер 560 кВт = \$95 000,00 — монтаж, включая трубную обвязку, фундамент, помещение и т. д.

Топливо для бойлера = 3256 кДж/кг выпаренной воды.

Рабочее время в год = 4000 ч/год.

Техническое обслуживание и запасные части = \$2500/год.

*Эксплуатационные затраты*

Амортизация

\$95 000/5 лет × 4000 ч/год \$4,75/ч

Техническое обслуживание и запасные части

\$2500/4000 ч \$0,63/ч

Электроэнергия

18,8 кВт × \$0,055/кВт · ч \$1,03/ч

Топливо (Бункер С)

$\frac{6800 \text{ кг/ч} \times 3130 \text{ кДж/кг} \times \$120 / \text{м}^3}{40\,000\,000 \text{ кДж/м}^3}$  \$63,85/ч

ИТОГО: \$70,26/ч

Затраты на пар

$\frac{70,26 \text{ $/ч} \times 1000}{6800 \text{ кг/ч}}$  \$10,33/1000 кг пара

Без учета заработной платы, налогов, процентов и т. д.

## 6.6.2 Способы экономии энергии

Многие существующие выпарные установки сконструированы во времена низких цен на энергию с учетом минимизации капитальных затрат. В условиях сильного роста цен на нефть значительных преимуществ можно достичь путем модернизации существующих выпарных аппаратов для сокращения затрат на энергию в процессе выпаривания. Для модернизации существующих выпарных аппаратов в целях экономии энергии имеется три основных возможности.

1. **Переналадка существующего выпарного аппарата.** Подобная низкозатратная модернизация не меняет базовой схемы конструкции (например, усовершенствования вентиляции и дополнительная герметизация, улучшение в уходе и обслуживании, повышенное внимание к предупреждению утечек и т. п.).
2. **Модернизация вспомогательного оборудования.** Эти средnezатратные модернизации обычно должны быть санкционированы на уровне руководства цеха (например, повышение регенерации тепла от конденсатов и потоков продукта).

3. **Существенные модернизации оборудования.** Подобные высокозатратные изменения обычно санкционируются руководством предприятия (например, установка дополнительных корпусов или добавление установки компрессии пара).

Типичные способы экономии энергии сведены в табл. 6.8. Действительная экономия энергии и сокращение эксплуатационных затрат зависят от условий эксплуатации существующих систем выпаривания.

### 6.6.3 Экономический эффект от экономии энергии

Со времен кризиса, разразившегося в конце семидесятых годов, в пищевой промышленности предпринимались настойчивые попытки определить наиболее энергоемкие операции, а также способы экономии энергии. Выпаривание — один из наиболее энергоемких технологических процессов в пищевой промышленности [1], и были проанализированы и продемонстрированы различные способы экономии энергии при выпаривании, включая увеличение числа корпусов и внедрение систем автоматического регулирования.

Было показано, что энергопотребление в четырехкорпусной семиступенчатой выпарной установке системы *TASTE* производительностью по выпаренной влаге 18 140 кг/ч находится в пределах от 836 и 1000 кДж на 1 кг выпаренной воды. В результате добавления после четвертой ступени еще одного корпуса и одной ступени энергопотребление сократилось до 560–640 кДж на 1 кг выпаренной воды [7].

Для повышения эффективности энергопотребления в системы автоматического регулирования выпарными аппаратами были внедрены компьютерные методы. Так, например, традиционная система управления многокорпусной выпарной установки типа *TASTE* состоит из двух управляющих пневмоклапанов (один — для управления паром, а второй — для управления расходом подаваемого сока). С помощью ручного управления обычно устанавливается расход пара при постоянном давлении, а расход

Таблица 6.8. Типичные способы экономии энергии

Способ	Капитальные затраты	Достижимая экономия энергии, %
Герметизация и термоизоляция	Низкие	5
Улучшение технического обслуживания	Низкие	5
Теплообменники для регенерации теплоты	Низкие	10
Повторное использование конденсата	Низкие	5
Термическая компрессия вторичного пара	Средние	45
Механическая компрессия вторичного пара	Высокие	70–90
Увеличение числа корпусов	Высокие	$\left(1 - \frac{N}{N+n}\right) 100\%$

Примечание:  $N$  — первоначальное количество корпусов;  $n$  — количество добавленных корпусов. Пример: экономия при доведении трехкорпусной выпарной установки до четырехкорпусной равна при-

мерно  $\left[1 - \frac{3}{3+1}\right] 100\% = 25\%$ . По [1].

материала настраивается вручную в соответствии с желаемой концентрацией СВ в продукте (по Бриксу). Атмосферное давление пара зависит от высоты местности, а давление пара, выводимого из последнего корпуса, зависит от охлаждающей воды. В ходе эксплуатации такой системы устанавливается распределение температур между корпусами, и устойчивая работа достигается только через некоторое время. Задачей операторов установки является достижение установившегося режима для нужной откачки готового продукта. К сожалению, эта желаемая откачка в течение нескольких минут может изменяться на несколько градусов по Бриксу без изменения каких-либо настроек (из-за флуктуаций градусов Брикса подаваемого материала, его расхода, а также расхода пара или изменения условий окружающей среды — например, температуры, скорости ветра, осадков и т. п.), и любая попытка скорректировать подобные отклонения может потребовать изменений расхода подаваемого материала и/или пара методом проб и ошибок. Длительное отклонение от требуемых значений может привести не только к выпуску некондиционного продукта, но и к потере полезной энергии. Такая потеря энергии может возникать из-за избыточного выпуска пара в атмосферу. Экономия энергии может достигаться путем перехода с ручного на компьютерное автоматизированное управление. Было показано, что отношение паропроизводительности шестикорпусной выпарной установки *TASTE* при ручном и автоматическом управлении составило 4,63 и 4,94 соответственно, что свидетельствует о возможности экономии энергии с помощью автоматического регулирования для данной конкретной системы на 6,7%.

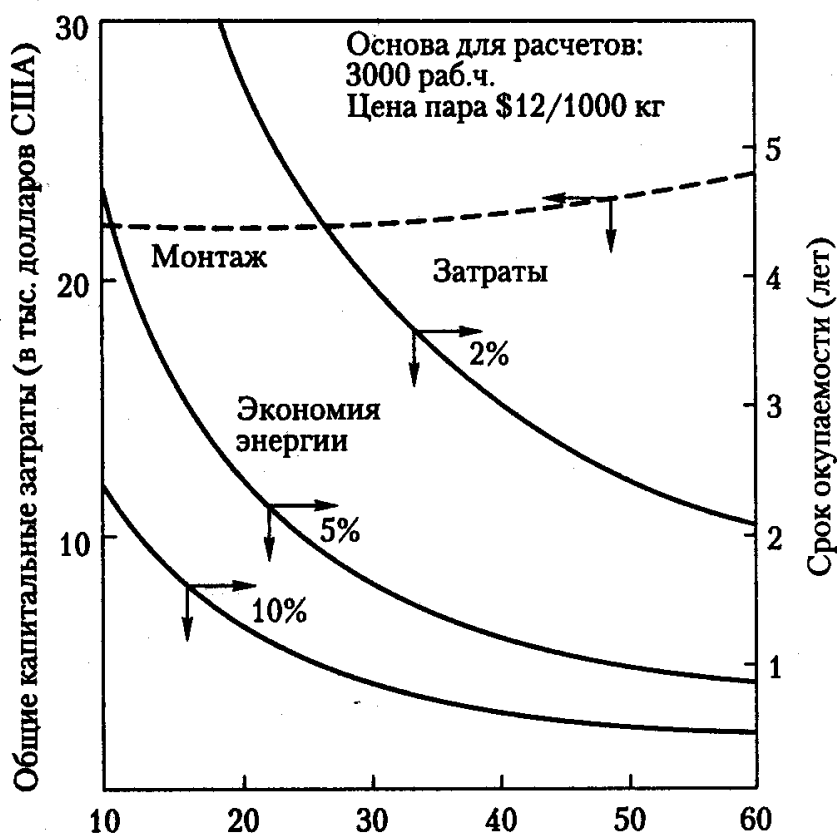


Рис. 6.11. Капитальные затраты и срок окупаемости при компьютерном управлении пятикорпусной выпарной установкой для цитрусовых типа *TASTE*. Данные по [8]

Сокращение энергопотребления при выпаривании зависит от нескольких факторов — например, от производительности выпаривания, количества корпусов, эффективности технологии и количества рабочих часов в году. Экономия затрат и окупаемость зависят от соотношения затрат на систему регулирования и затрат на топливо, а также от экономии энергии. Оценка капитальных затрат и период окупаемости при автоматическом регулировании пятикорпусной выпарной установки в 1980 г. приведены на рис. 6.11 [8].

## Список обозначений

$A, A_i$	Площадь теплопередающей поверхности выпарного аппарата, $\text{м}^2$
$a_w$	Активность воды
$B, B_p, \Delta T_b$	ПТК, повышение точки кипения, $^{\circ}\text{C}$
$C_e$	Затраты на испарительную установку, \$
$C_s$	Стоимость 1 кг пара, \$/кг
$C, C_p, C_p$	Удельная теплоемкость подаваемого материала или концентрата, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$
$d$	Диаметр теплопередающей трубы
$E$	Паропроизводительность
$F, F_i$	Расход подаваемого материала, $\text{кг}/\text{ч}$
$H, H_p, \Delta H$	Энтальпия, $\text{кДж}/\text{кг}$
$h$	Коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$
$K$	Удельные затраты на площадь поверхности теплопередачи, $\$/\text{м}^2$
$K_v$	Константа ПТК, $\text{кг} \cdot \text{K}/(\text{кг} \cdot \text{моль})$
$k$	Теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$
$L, L_i$	Расход жидкости, $\text{кг}/\text{ч}$
$M_j$	Доля парораспределения в параллельных ступенях
$N, n$	Количество корпусов
$P, p$	Давление, Па
$Q$	Скорость теплопередачи, $\text{кДж}/\text{ч}$
$Q_1$	Скорость теплопередачи для предварительного нагрева, $\text{кДж}/\text{ч}$
$Q_n$	Скорость теплопередачи для повторного нагрева, $\text{кДж}/\text{ч}$
$S$	Энтропия, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$
$T$	Температура; температура жидкости, $^{\circ}\text{C}$
$T_i$	Температура кипения жидкости на ступенях от 1 до $N$ , $^{\circ}\text{C}$
$T_s$	Температура пара, $^{\circ}\text{C}$
$T_{fo}$	Начальная температура подаваемого материала, $^{\circ}\text{C}$
$T_{fi}$	Температура подаваемого материала на выходе из $i$ -того предварительного нагревателя, $^{\circ}\text{C}$
$T_n$	Температура подаваемого материала на выходе из промежуточного нагревателя, $^{\circ}\text{C}$
$U, U_i$	Коэффициент теплопередачи для $i$ -той ступени, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$
$V$	Общее количество удаленной воды; общий испарительный расход, $\text{кг}/\text{ч}$
$V_o$	Расход острого пара, $\text{кг}/\text{ч}$
$V_i$	Расход испаряющегося материала, $\text{кг}/\text{ч}$
$V_s$	Количество острого пара, $\text{кг}$
$V_T$	Общее количество пара, $\text{кг}$
$W$	Работа по сжатию 1 кг пара, $\text{кДж}/\text{кг}$

$X_i$	Содержание СВ, °Брикса
$X_s$	Массовая доля растворимых СВ; содержание СВ, °Брикса
$\lambda$	Скрытая теплота испарения, кДж/кг
$\Theta$	Время нахождения (пребывания) в аппарате, ч
$\Sigma$	Знак суммирования

## Список сокращений

ПТК	— повышение точки кипения, °С
LMTD	— <i>Log Mean Temperature Difference</i> , логарифм среднего перепада температур, °С
P/H	— предварительный подогреватель
R/H	— промежуточный подогреватель

## Значения индексов

$b$	— boiling (кипячение)
$f$	— liquid (жидкость)
$i, j$	— 1, 2, 3, ..., $n$ (количество корпусов или ступеней или количество подогревателей); inside— внутренний)
$m$	— mean (средний)
$o$	— initial, steam, outside (начальный, пар, внешний)
$p$	— product (продукт)
$s$	— steam-side; steam; soluble solids (со стороны пара; пар; растворимые СВ)
$v$	— vapor (пар, испарение)
*	— подогреватель
**	— промежуточный подогреватель

## Литература

1. Upgrading Existing Evaporators to Reduce Energy Consumption. — U.S. Dept. of Commerce, Virginia: ERDA, 1977.
2. Badger, W. L., and Banchero. Introduction to Chemical Engineering. — NY: McGraw-Hill, 1955.
3. Burgois, J. and Le Maguer, M // J. Food Eng. — 1987. — № 3. — P. 39–50.
4. Chen, C. S. // Trans. ASAE. — 1982. — № 25(5). — P. 1457–1463.
5. Chen, C. S. Evaporarion in the citrus industry, presented at AICHE, Orlando, FL.
6. Chen, C. S. // Fruit Juice Processing Technology / Nagy, S., Chen C. S. and Shaw P. E. (eds.). — Auburndale, FL: Agscience, FL, 1993.
7. Chen, C. S. et al. // Changing Energy Use Futures. — Vol. 4 / Fazzolare and Smith (eds.). — NY: Pergamon Press, Elmsford, 1979.
8. Chen, C. S. et al. // Trans. Citrus Eng. Conf. Fla, Sec. ASME. — 1981. — № 27. — P. 58–80.
9. Coulson, J. M. and Richardson J. F. Chemical Engineering. — Vol. 2. — NY: Pergamon Press, 1978.
10. Dinnage, G. F. // Proc. 20<sup>th</sup> Annu. Nat Dairy Eng. Conf. — East Lansing, MI: MSU, 1972.

11. Filho, G. et al. // J. Food Process. Eng. — 1984. — № 7. — P. 77–89.
12. Holland, C. D. Fundamentals and Modelling of Separation Processes. — Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1975.
13. Keenan, J. H., Keyes, F. G., Hill, P. G. and Moore, J. G. Steam Tables — Metric Units. — NY: John Wiley, 1969.
14. Kern, D. Q. Process Heat Transfer. — NY: McGraw Hill, 1950.
15. King, C. J. Separation Processes. — NY: McGraw Hill, 1980.
16. Heat Transfer in Food processing / Matthews R. F. (ed). — Gainesville, FL: University of Florida, 1976.
17. McAdams, W. H. Heat Transmission. — NY: McGraw Hill, 1954.
18. McCabe, W. L. and Smith J. C. Unit Operations of Chemical Engineering. — 3<sup>rd</sup> ed. — NY: McGraw Hill, 1976.
19. Milton, P. E. Handbook of Evaporation Technology. — Fairview, NJ: Noyes Publishing, 1986.
20. Muddavar, I. A. and El-Masri // Int. J. Multiphase Flow. — 1986. — № 12(5). — P. 771–790.
21. Fruit Juice Processing Technology / Nagy, S., Chen, C. S. and Shaw, P. E. (eds). — Auburndale, FL: AgScience, 1993.
22. Physical and Chemical Properties of Food / Okos, M. R. (ed.). — St. Joseph, MI: ASAE, 1986.
23. Olesen, R. K. // Int. Trade Forum. — 1990. — № 26(4). — P. 12–17.
24. Piret, E. L. and Isbin, H. S. // Chem. Eng. Progr. — 1986. — № 50(6). — P. 305.
25. Rebeck, H. // Heat Transfer in Food processing / Matthews R. F. (ed). — Gainesville, FL: University of Florida, 1976.
26. Redd, J. B. and Hendrux, C. M., Jr. // Fruit Juice Processing Technology / Nagy, S., Chen, C. S. and Shaw, P. E. (eds). — Auburndale, FL: AgScience, 1993.
27. Schwartzberg, H. G. // Food Tech. — 1977. — March. — P. 67–76.
28. Shinskey, F. G. Energy Conservation through Control. — NY: Academic Press, 1978.
29. Skoczylas, A. // Br. Chem. Eng. — 1970. — № 15(2). — P. 221–222.
30. Standiford, F. C. // Chem. Eng. — 1963. — № 70(25). — P. 164–170.
31. Standiford, F. C. Evaporation // Perry's Chemical Engineers' Handbook. — 5<sup>th</sup> ed. / Perry Chilton (ed.) — NY: McGraw Hill, 1973.
32. Wiegand, B. W. H. // Trans. Citru. Eng. Conf. Fla. Sec. ASME. — 1992. — № 38. — P. 64–78.

## Дополнительная отечественная литература

- Таубман Е. И. Выпаривание — М.: Химия, 1982. — 327 с.
- Федоткин И. М., Ткаченко С. И. Теплогидравлические процессы в выпарных аппаратах. — Киев: Техніка, 1975. — 212 с.
- Гельперин Н. И. Выпарные аппараты. — М.—Л.: Госхимиздат, 1947. — 380 с.
- Кичигин М. А., Костенко Г. Н. Теплообменные аппараты и выпарные установки. — М.: Госэнергоиздат, 1956. — 392 с.
- Тищенко И. А. Теория и расчет многокорпусного выпарного аппарата. — М.: ОНТИ, 1938. — 112 с.
- Чернобыльский И. И. Выпарные установки. — Киев: изд-во Киевского гос. ун-та, 1960. — 260 с.
- Слесаренко В. Н. Дистилляционные опреснительные установки. — М.: Энергия, 1980. — 243 с.
- Марценюк А. С., Стабников В. Н. Пленочные тепло- и массообменные аппараты в пищевой промышленности. — М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1981. — 243 с.
- Страхов В. В. Вакуумвыпарные установки молочной промышленности и их эксплуатация. — М.: Пищ. пром-сть, 1970. — 142 с.
- Перцев Л. П., Ковалев Е. М., Фокин В. С. Трубчатые выпарные аппараты для кристаллизующихся растворов. — М.: Машиностроение, 1982. — 136 с.
- Бакластов А. М., Горбенко В. А., Удыма П. Г. Проектирование, монтаж и эксплуатация тепло-массообменных установок. — М.: Энергоиздат, 1981. — 336 с.
- Коган В. Б., Харисов М. А. Оборудование для разделения смесей под вакуумом. — Л.: Машиностроение, 1976. — 376 с.



- Олевский В. М., Ручинский В. Р., Кашников А. М., Чернышев В. И. Пленочная тепло- и массообменная аппаратура. — М.: Химия, 1988. — 240 с.
- Олевский В. М., Ручинский В. Р. Роторно-пленочные тепло- и массообменные аппараты. — М.: Химия, 1977. — 208 с.
- Либерман И. Г., Бурда Б. О., Полторак А. О. Автоматизированное проектирование оптимальных технологических систем пищевой промышленности. — М.: Легк. и пищ. пром-сть, 1981. — 272 с.
- Матвеев П. С., Стабников В. Н. Струйные аппараты в пищевой промышленности. — М.: Пищ. пром-сть, 1980. — 224 с.
- Кименов Г. А. Рациональное использование топлива и энергии в пищевой промышленности / Пер. с болг. — М.: Агропромиздат, 1990. — 167 с.
- Разладин Ю. С., Сагань И. И., Стабников В. Н. Использование вторичных энергоресурсов в пищевой промышленности. — М.: Легк. и пищ. пром-сть, 1984. — 232 с.
- Василинец И. М., Сабуров А. Г. Роторные пленочные аппараты в пищевой промышленности. — М.: Агропромиздат, 1989. — 136 с.
- Сенеш Э., Надабан П. Процессы выпаривания в пищевых производствах / перев. с венг. — М.: Пищевая промышленность, 1969. — 312 с.

# 7 МАТЕРИАЛЬНЫЙ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНСЫ

*Брайан Е. Фаркаш и Даниель Ф. Фаркаш*

*Перевод В. Ашкинази под ред. канд. техн. наук С. В. Мурашева*

## Содержание

- 7.1 Введение в материальный и энергетический балансы в пищевой промышленности
  - 7.1.1 Введение
  - 7.1.2 Материальные и энергетические балансы операций категории I
  - 7.1.3 Материальные и энергетические балансы операций II категории
  - 7.1.4 Материальные и энергетические балансы операций III категории
  - 7.1.5 Материальные и энергетические балансы операций IV категории
  - 7.1.6 Используемая терминология
- 7.2 Материальные балансы
  - 7.2.1 Общий массовый баланс
  - 7.2.2 Применение массовых балансов к переработке растительного и животного сырья
    - 7.2.2.1 Очистка от кожуры (шелушение, лущение)
    - 7.2.2.2 Мембранное отделение и противоточная экстракция
  - 7.2.3 Выводы
- 7.3 Энергетические балансы
  - 7.3.1 Определения используемых терминов
  - 7.3.2 Энтальпия
  - 7.3.3 Составление энергетических балансов: общий метод
  - 7.3.4 Примеры отдельных операций и источники энергии
- 7.4 Связанные материальные и энергетические балансы
- 7.5 Экономика материальных и экономических балансов и некоторые выводы
- Глоссарий
- Литература
- Дополнительная литература

## 7.1 Введение в материальный и энергетический балансы в пищевой промышленности

### 7.1.1 Введение

Материальный и энергетический балансы — полезнейшие инструменты инженера. Они лежат в основе «инженерного подхода» к созданию новых технологических процессов или к анализу результатов заводских испытаний. Материальный и энергетический балансы играют важную роль в оптимизации технологических процессов, экономическом анализе вариантов технологий, снижении отходов и выборе таких модификаций технологии, которые позволяют увеличить выход продукции. Например, инженер на производстве для увеличения рентабельности может выбрать путь уменьшения количества отходов или энергопотребления. Уменьшение количества отходов может быть достигнуто за счет увеличения доли желаемого продукта и уменьшения доли побочных продуктов или использованием их для получения полезного продукта. Уменьшение энергопотребления требует, чтобы инженер знал, как, почему и где энергия потребляется и каков необходимый для данного процесса минимум энергии.

Обработка пищевых продуктов отличается от обработки других материалов тем, что обрабатываемое сырье состоит обычно из растительной или животной ткани, которая может включать живые и неживые клетки.

В книге *Конструирование установок и экономика для инженеров-химиков* [26] приводится перечень из восьми требований, которые для успешного конструирования установок должны быть определены в довольно узких пределах. Первое требование — это определение технологического процесса. Следующее требование заключается в составлении для него материального и энергетического балансов для каждой единичной операции или отдельного подпроцесса. Иначе говоря, инженер-пищевик должен быть в состоянии количественно представить потоки продукта, побочного продукта, отходов, сточных вод и энергии на «границах», разделяющих единичные операции.

Реальные материальный и энергетический балансы необходимы для создания экономически жизнеспособного технологического процесса получения безопасных и питательных пищевых продуктов, соответствующих всем требованиям к качеству. Материальные и энергетические балансы — основа рентабельных с точки зрения стоимости и экологически приемлемых процессов и установок. В конечном итоге они служат основой для проектирования автоматизированного производства, помогая определить передаваемый на склад товарный продукт, потоки побочных продуктов, график поставки ингредиентов, поставляемых строго по календарному графику, а также «расписать» трудовые затраты, потребность в тех или иных приспособлениях, мойке и очистке, уходу и обслуживанию и т. п.

Материальные и энергетические балансы очень важны для разработки технологических процессов в пищевой промышленности. Их можно использовать для подбора оборудования или для определения экономически наиболее выгодных вариантов, но для инженеров-пищевиков с ограниченным опытом работы бывает сложно правильно рассчитать материальные и энергетические балансы для технологического оборудова-

ния и типичных пищевых ингредиентов. *Пищевая технология* — это превращение *живых тканей растительного и животного происхождения в съедобные продукты*. Данная глава должна помочь инженеру-пищевiku на производстве рассчитывать материальные и энергетические балансы приемлемого качества для наиболее распространенных операций и процессов, используемых для превращения сырых растительных и животных материалов в готовые для продажи съедобные пищевые продукты.

Здесь мы не будем касаться некоторых вопросов составления материальных и энергетических балансов, обычно рассматриваемых в литературе по химической технологии — например, стехиометрии, анализа материальных балансов при реакциях чистых химических веществ. Мы не будем затрагивать также процессы, в которых за счет окислительных или экзотермических реакций вырабатывается большое количество энергии. Информация по стехиометрии имеется в разделе «Дополнительная литература» в конце данной главы.

Технологические операции в производстве пищевых продуктов отличаются от обычных химико-технологических операций тем, что материалы, используемые в качестве исходного сырья, получают обычно из живых растений и животных или их частей. Эти материалы (представляющие собой массивы клеток) могут быть очищены для получения чистых химических соединений (как при производстве чистой сахарозы из сахарного тростника или сахарной свеклы). Часть растения или животного может быть отделена от несъедобной ткани и сохранена с помощью нагрева или охлаждения (морепродукты, домашняя птица, фрукты или овощи сохраняют путем пастеризации, стерилизации, охлаждения или замораживания). Состав сырья растительного или животного происхождения очень разнообразен, вследствие чего для получения точных балансовых соотношений, используемых при анализе процессов по переработке исходного сырья, могут потребоваться дополнительные данные, основанные на исследовании проб сырья. Эти данные могут быть получены на опытных образцах технологической линии или в результате измерений на уже существующих линиях. Инженер-пищевик должен знать об изменчивости сырья вследствие сезонных изменений, а также в зависимости от страны или региона, из которых сырье получено, сорта и условий роста.

Для расчета материальных и энергетических балансов технологические операции пищевого производства можно разделить на четыре большие категории. Операции I и II категорий отражают минимальный массоперенос, но могут сопровождаться теплотеплообменом. Они могут быть получены путем относительно простых вычислений с использованием данных из справочников. Операции III и IV категорий хуже поддаются расчетам на основании справочных данных, и их результаты должны подтверждаться проведением испытаний на опытной установке или технологической линии (это, в основном, обусловлено сложной природой пищевых материалов и широким диапазоном их составов из-за биологических изменений).

**Категория I** включает операции соединения и смешивания ингредиентов (с нагреванием или без) для получения пищевых продуктов в соответствии с рецептурой. Эта категория также включает такие единичные операции, как эмульгирование, пенообразование и нанесение покрытий (глазирование). Материальные балансы в этом случае относительно просты и зачастую могут быть выполнены на основе справочных данных.

**Категория II** включает операции, требующие в основном энергетических балансов, связанных с сохранением уже упакованного пищевого продукта (с помощью нагревания или охлаждения). Эта категория также включает энергетические балансы, связанные с ионизирующим излучением, сверхвысоким давлением и другими способами сохранения продукта с минимальным использованием тепла. Продукт перед обработкой обычно упаковывается. Энергетические балансы обычно могут быть получены на основе справочных данных.

**Категория III** включает операции превращения живых тканей растительного и животного происхождения в пищевые ингредиенты с помощью механической обработки (мойки, очистки от кожуры, сортировки по размеру, измельчения, контроля и удаления дефектных материалов, а также транспортировки). Некоторый диффузный массоперенос может происходить вследствие случайных потерь растворимых веществ в ходе водного выщелачивания. Для большинства операций этой категории массоперенос минимален. Массовые балансы могут отражать выход съедобных материалов, побочных продуктов и отходов.

**Категория IV** включает операции, в которых происходит сложный одновременный тепло- и массоперенос. Эта категория включает бланширование, выпечку, сушку, сгущение (выпаривание), дистилляцию, нагревание вдуванием пара, экструзию, а также испарительные или вакуумные методы охлаждения. Материальные и энергетические балансы в этом случае почти всегда требуют эксплуатационных испытаний для подтверждения принятых допущений и расчетов, основанных на справочных данных.

Обычно материальные и энергетические балансы операций, относящихся к категориям I и II, проще в расчетах, они могут быть более точными и выполнены с меньшим количеством допущений, чем операции категорий III и IV, поскольку меньше зависят от состава обрабатываемого материала. Например, по справочнику [23] и с помощью компьютерного моделирования [28] можно получить очень точные данные по скорости нагрева и значениям теплоты, необходимым для термической стерилизации (операция категории II) различных порций консервированного тыквенного пюре. И наоборот, довольно трудно определить выход готового продукта, энергетические требования, объемы побочных продуктов и состав отходов при производстве тыквенного пюре из натуральной тыквы. Этот процесс включает ряд операций категорий III и IV. Большое влияние на материальные и энергетические балансы оказывает метод нагрева тыкв (например, острым паром или погружением в воду) [4]. Такие факторы, как выщелачивание растворимых веществ и поглощение воды, трудно предсказать, и поэтому они должны быть определены с помощью реальных испытаний.

## 7.1.2 Материальные и энергетические балансы операций категории I

Операции категории I включают смешивание ингредиентов для получения определенного пищевого продукта. Типичный пример — это смешивание вкусовых добавок и ароматизаторов, сахара, красителя и воды для получения соковых напитков. Материальный баланс операций категории I обычно можно с приемлемой степенью точности рассчитать на основе справочных данных — по составу ингредиентов, физическим и теплофизическим свойствам. Уравнение (7.1) дает оценку удельной теплоемкости  $c_p$

(кДж/(кг · °С)) некоторого пищевого продукта на основе его состава, а уравнение (7.2) позволяет оценить удельную теплоемкость мясных продуктов с содержанием воды выше 26% и фруктовых соков с содержанием воды более 50% [29]:

$$c_p = 1,424m_c + 1,549m_p + 1,675m_f + 0,837m_a + 4,187m_m, \quad (7.1)$$

где  $m$  — это массовая доля того или иного компонента в соответствии с индексами:  $c$  — углевод;  $p$  — белок (протеин);  $f$  — жир;  $a$  — зола;  $m$  — влага;

$$c_p = 1,675 + 0,025 w, \quad (7.2)$$

где  $w$  — содержание воды, %.

Оба уравнения показывают, что удельную теплоемкость определяет в основном содержание влаги.

Материально-энергетический баланс, составленный на основе справочных данных и с использованием описанных уравнений может быть использован для оценки выхода, энергии и требований к водо- и энергоснабжению при производстве соков и мясных продуктов.

### Пример 7.1. Производство консервированного овощного сока

Планируется выпуск консервированного напитка, содержащего морковный и томатный соки, а также сок сладкого красного перца, соль, сахар, лимонную и аскорбиновую кислоты. Состав 100 частей продукта: 0,05 соли; 0,10 сахара; 0,05 лимонной кислоты, аскорбиновая кислота<sup>1</sup>; 16,70 — морковный концентрат; 16,70 — томатный концентрат; 16,70 — концентрат сладкого красного перца; 49,70 — вода. Содержание растворимых сухих веществ в смеси (углеводов) — 20%.

Соки сладкого красного перца и моркови поставляются в виде замороженного концентрата. Томатный концентрат поставляется в больших асептических картонных упаковках на 300 галлонов (английский галлон — 4,54 л, американский галлон — 3,78 л). Все концентраты соков закупаются с 30%-ной концентрацией растворимого сухого вещества. Другие ингредиенты (соль, краситель, вкусовые добавки и ароматизаторы, сахар, лимонная и аскорбиновая кислоты) закупаются в сухом виде. Готовый продукт будет разливаться в банки емкостью 46 жидких унций (1,36 л) при минимальной температуре 93 °С. Производительность линии должна составлять 300 банок в минуту при двух сменах по 4 часа в день.

Сокращенная схема технологического процесса для смешивания, нагревания, наполнения банок, герметизации и охлаждения приведена ниже:



Основой для расчета материально-энергетического баланса является работа в течение 1 ч. Первым применением материально-энергетического баланса может быть его использование для оценки производительности производственного оборудования, необходимого для каждой операции.

<sup>1</sup> Аскорбиновая кислота должна присутствовать в концентрации 100 мг на порцию. Обычная порция составляет 300 мл.

Приведенная информация указывает, что готовый продукт будет упаковываться в банки, содержащие 1,36 л (цилиндр № 3, 404 × 700), однако масса содержимого банки не указана, и поэтому массовый расход продукта должен быть оценен по его удельной массе. Масса нетто банки сока (1,36 л) с 20% растворимых сухих веществ может быть оценена по опубликованным значениям удельной массы подобных фруктовых и овощных соковых продуктов [15]. Значение 1,09 соответствует удельной массе при содержании растворимых сухих веществ 20%. Это значение соответствует массе на этикетке 1460 г. В этом случае массовый расход в час составляет:

$$(300 \text{ банок/мин})(60 \text{ мин/ч})(1,460 \text{ кг/банка}) = 26\,280 \text{ кг/ч.}$$

С помощью уравнения (7.2) можно оценить удельную теплоемкость сока — 3,7 кДж/(кг · °C). Эти данные, масса и теплоемкость сока в жестяных банках позволяют рассчитать скорость подачи каждого ингредиента в час и энергию, необходимую в течение часа для нагрева соковой смеси от температуры, при которой она находится в резервуаре, до температуры стерилизации. Кроме того, потоки охлаждающей воды для банок, поступающих на этикетирование, могут быть оценены на основе температуры охлажденной банки (32 °C).

Этот пример показывает, как можно получить данные для оценки материальных и энергетических балансов при известном составе ингредиентов. Зачастую полезную оценку нужного параметра дает простой график взаимосвязи содержания влаги или плотности с соответствующими теплофизическими свойствами рассматриваемого пищевого продукта.

### 7.1.3 Материальные и энергетические балансы операций II категории

Операции II категории — это обработка упакованных продуктов, которые в целях их сохранения могут подвергаться перед хранением и отправкой в торговую сеть однократному или неоднократному нагреванию или охлаждению или другой обработке (например, воздействию излучения, высокого давления или вакуумирования). Нагрев и охлаждение выполняются для сохранения упакованных продуктов (нагрев служит для инактивации микроорганизмов, а охлаждение проводится до температуры, при которой рост микроорганизмов тормозится или прекращается). Хранение при температурах ниже –18 °C эффективно подавляет рост всех микроорганизмов, вызывающих порчу пищевых продуктов. Реакции, вызывающие потерю вкуса и цвета, могут происходить при –18 °C из-за действия ферментов или присутствия кислорода.

#### *Пример 7.2. Оценка энергетических требований при охлаждении консервированных продуктов*

В примере 7.1 был показан расчет простого энергетического баланса категории II. В настоящем же примере наполненные и герметизированные банки с соком перед этикетированием должны охлаждаться от 93 до 32 °C. Масса банки (цилиндр № 3, 404 × 700) должна быть определена взвешиванием, так как характеристики банки не даны. Средняя масса банки оказалась равной 170 г. При производительности линии 300 банок/мин каждый час будет выпускаться 18 000 банок, и общая масса банок будет равна 3060 кг. Теплоемкость  $c_p$  стали равна 0,46 кДж/(кг · °C). Энергия, которая должна быть отведена от банок с соком за 1 ч при охлаждении от 93 до 32 °C, равна сумме массы сока, умноженной на разность температур, а также на теплоемкость сока, и массы стали, умноженной на теплоемкость стали.

$$\begin{aligned} m_{\text{сок}} &= 26\,280 \text{ кг}, & c_{p, \text{сталь}} &= 0,46 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}), \\ c_{p, \text{сок}} &= 3,7 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}), & T_0 &= 93 ^\circ\text{C}, \\ m_{\text{сталь}} &= 3060 \text{ кг}, & T_f &= 32 ^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Энергия, отводимая за час от стальных банок:

$$Q_{\text{банки}} = (3060 \text{ кг/ч})[0,46 \text{ кДж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}](93^\circ\text{C} - 32^\circ\text{C}) = 85\,864 \text{ кДж/ч.}$$

Энергия, отводимая за час от сока:

$$Q_{\text{сок}} = (26\,280 \text{ кг/ч})[3,7 \text{ кДж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}](93^\circ\text{C} - 32^\circ\text{C}) = 5\,931\,400 \text{ кДж/ч.}$$

Общая необходимая энергия охлаждения составляет:

$$Q_{\text{общая}} = Q_{\text{банки}} + Q_{\text{сок}} = 6\,017\,264 \text{ кДж/ч.}$$

Следует отметить, что необходимая энергия для охлаждения банок составляет лишь около 1,5% полной требуемой энергии.

Нагрев герметизированных банок с применением пара для обеспечения полной инактивации микроорганизмов может потребовать более сложного расчета энергетического баланса, зависящего от особенностей применяемого оборудования. Например, пар может использоваться для удаления воздуха (продувки) из перегонных автоклавов так, чтобы каждая упаковка находилась в атмосфере чистого пара. Требования к пару для продувки должны определяться на основе опыта работы или по данным производителя. Оценка расхода пара для нескольких консервированных фруктовых и овощных продуктов при движении потока пара через отверстия различного размера дается в работе [19].

### 7.1.4 Материальные и энергетические балансы операций III категории

Рентабельность переработки сырья растительного и животного происхождения в ингредиенты для непосредственного потребления или для дальнейшей обработки зависит от общего выхода пищевого продукта. Оценки выхода пищевого материала из растительного и животного сырья можно найти в литературе. Так, в [15] приводятся выходы овощей на акр и массовые их эквиваленты по необработанным и обработанным продуктам, то есть массовый выход обработанного продукта на единицы массы взвешенного на ферме сырья. Например, для получения 1 кг замороженных яблок требуется 1,67 кг свежих фруктов, что свидетельствует об общем выходе в 60%. Это значение может служить полезной исходной оценкой для расчета полного материального баланса линии по производству замороженных ломтиков яблок. Оно может быть полезным и для оценки энергетических требований при замораживании обработанного продукта. Было выявлено, что выход овощей варьируется от 27% (для сладкой кукурузы) до 92 и 95% (для лущеного гороха и лимской фасоли соответственно). Для оценки потерь при обработке можно использовать восьмой выпуск Сельскохозяйственного справочника [32] с таблицами данных по количеству съедобной части, содержащейся в 1 фунте приобретенных пищевых продуктов. В издании 1963 года в табл. 2 приведен материал (озаглавленный «отходы») с данными по доле отходов, возникающих при получении потребляемой части продукта. В этой таблице указана и природа отходов, что делает этот справочник особенно полезным.



Опубликованные значения полного выхода являются примерными, и большинство систем обработки пищевых продуктов могут достигать более высоких показателей. Общий выход является произведением выходов по отдельным материальным балансам для каждой единичной операции, применяемой для превращения сырья в готовый продукт. В литературе, посвященной технологии производства пищевых продуктов, имеются многочисленные ссылки на исследования, направленные на увеличение выхода годных к употреблению продуктов после таких единичных операций, как мойка, очистка от кожуры, измельчение, сортировка и транспортировка. Большие потери могут иметь место при очистке от кожуры и измельчении. Классификация сырья по величине с широким диапазоном размеров для получения фракций с узким диапазоном размеров может приводить к большим объемам побочных продуктов, имеющих размеры больше или меньше необходимых. Использование несортовых материалов и материалов, несоответствующих требованиям и полученных в ходе классификации по величине, могут играть важную роль в оценке рентабельности технологической линии по обработке сырья.

### **7.1.5 Материальные и энергетические балансы операций IV категории**

В эту категорию включены операции и процессы, включающие одновременно тепло- и массоперенос. Примерами таких операций могут служить бланширование; различные методы дегидратации, включая обжаривание; сушка на открытом воздухе; перфузия (диффузионное испарение, испарение через полупроницаемую перегородку); сублимационная сушка; перегонка и упаривание. Процедуры для точной оценки материальных и энергетических балансов, включающих одновременно тепло- и массоперенос, представлены в разделе 7.4. Классические исследования бланширования [4] демонстрируют сложность расчета массового и энергетического балансов, если одновременно происходят водопоглощение, разрушение тканей в ходе нагревания и потери вследствие выщелачивания. В указанной работе были определены выходы по семи типичным замораживаемым видам овощей, бланшируемых паром, при одновременном протекании в ходе бланширования трех упомянутых выше изменений. Их индивидуальный вклад в полный выход, концентрация растворимых сухих веществ в потоке жидких отходов и состав конечного продукта для получения точной оценки истинного выхода продукта по сухому веществу требуют полного анализа всех потоков продуктов. Выходы и потери сухих веществ приведены в табл. 7.1.

Даже при наличии этих данных истинный выход растворимых в воде витаминов и вкусовых веществ должен определяться независимо, так как скорость удаления для любого отдельно взятого водорастворимого витамина может быть не связана с потерей сухих веществ продуктом. Чтобы состав продукта соответствовал данным, приведенным на этикетке, необходимо использовать соответствующие методы оценки содержания питательных веществ для каждой составляющей.

Когда вода используется в транспортировке, нагревании, охлаждении и мойке сырых растительных и животных тканей или в их осмотическом концентрировании (обезвоживании) необходимы тщательные исследования материального баланса. При осмотическом концентрировании вода удаляется путем погружения пищевого

**Таблица 7.1. Выход и потеря сухих веществ во время бланширования паром для различных овощей**

Материал	Выход, %	Потеря сухих веществ, %
Морковь	95,0	2,0
Горох	89,0	2,5
Овощная зеленостручковая фасоль	93,0	1,7
Лимская фасоль	97,0	0,5
Брокколи	98,0	1,9
Цветная капуста	97,0	2,1
Капуста брюссельская	101,8 <sup>a</sup>	1,16

<sup>a</sup> Масса с учетом поглощенной воды.

продукта в сироп, содержащий 60% или более сахарозы [18]. Скорость потери массы является функцией от размера куска, температуры, концентрации сиропа, скорости потока сиропа и состава. Состав конечного продукта будет представлять баланс между потерей воды и растворимых питательных веществ и поглощением сухих веществ сиропа. В работе [7] приводится аналогичный анализ по поглощению соли и этанола овощами, замороженными при  $-7^{\circ}\text{C}$  с использованием в качестве охладителя смеси, состоящей из 15% этанола и 15% хлорида натрия.

## 7.1.6 Используемая терминология

Перед расчетом материального или энергетического баланса того или иного технологического процесса необходимо сначала определить его тип. Типовые операции могут быть классифицированы по типу выхода, а именно как операции *периодического типа* («порционные»), *полунепрерывные* и *непрерывные*.

1. *Периодические операции.* В периодическом процессе загруженная порция материала обрабатывается и выгружается. При обработке материал не добавляется и не убавляется. П р и м е р. При сублимационной сушке камера загружается замороженным материалом, материал сушится и выгружается из камеры.
2. *Полунепрерывные операции.* Полунепрерывный процесс характеризуется непрерывной подачей и выгрузкой отдельных порций материала. П р и м е р. При туннельной сушке тележки с продуктом на лотках входят с одного конца туннеля и выходят с другого конца, и поэтому процесс называется полунепрерывным. Обратите внимание, что воздух может перемещаться как в направлении движения тележек, так и против.
3. *Непрерывные операции.* При непрерывном процессе материал на входе поступает, а продукт на выходе выводится непрерывно в ходе процесса. П р и м е р. При непрерывном производстве асептически обработанных соков жидкость проходит стадии *нагрев–выдержка–охлаждение* и упаковывается непрерывно.

Термины «*стационарное состояние*» и «*переходное состояние*» используются для описания соотношения между различными переменными технологического процесса (например, температуры, скорости потока или давления) и временем. Если эти

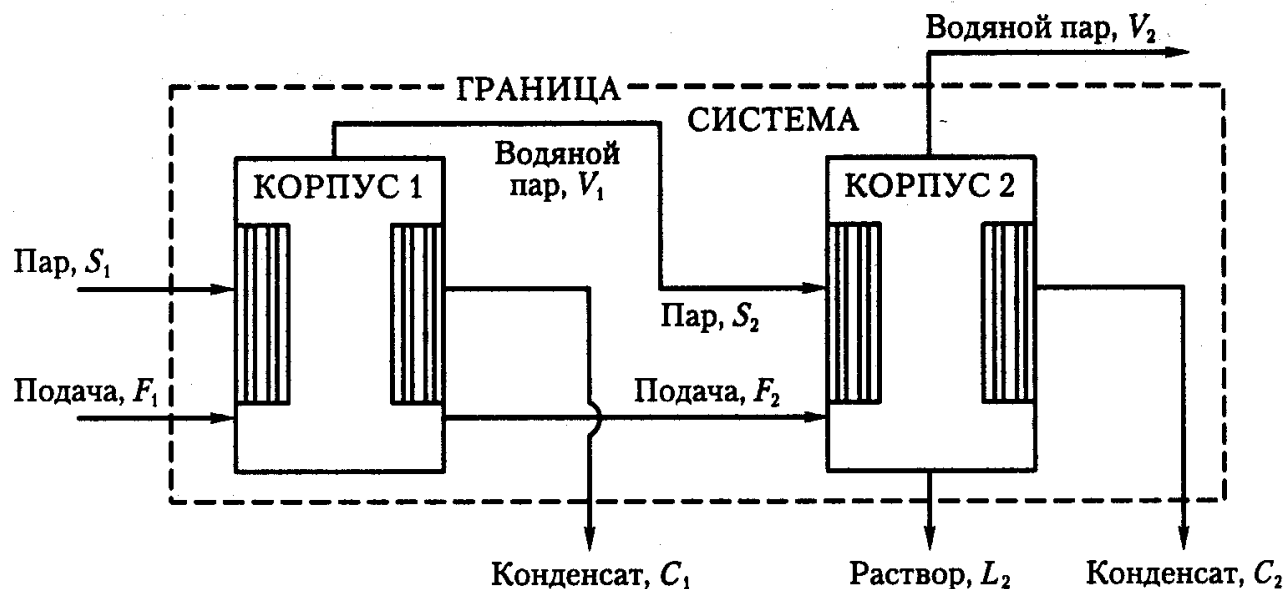


Рис. 7.1. Пример блок-схемы конкретной системы с границей для двухкорпусного выпарного аппарата с прямоточным питанием

переменные не зависят от времени, процесс называют *стационарным* или *установившимся*, а если они со временем меняются, то процесс называют *переходным* или *неустановившимся*. Обычно непрерывные процессы можно считать стационарными, а периодические/полунепрерывные процессы — переходными.

Расчеты материального и энергетического балансов проводятся для конкретной системы, которая может быть представлена полной технологической линией, одной установкой в линии или частью этой установки. Независимо от этого система определяется *границами*, устанавливаемыми при построении блок-схемы (технологической карты) данного процесса (рис. 7.1).

Система может быть *открытой* и *закрытой* в зависимости от того, пересекает ли материал в рассматриваемый период границу системы. Систему называют *закрытой*, если масса не пересекает ее границу, а в противном случае — *открытой*. По определению полунепрерывные и непрерывные процессы рассматриваются как открытые системы, а периодические процессы могут быть открытыми и закрытыми.

*Основа расчета* используется для упрощения процесса увеличения или уменьшения масштаба. Основой может служить единица времени (1 с, 1 мин, 1 ч), масса (1 кг) или удельный массовый расход (1 кг/с). Если в задаче указаны масса или удельный массовый расход, зачастую наиболее удобно использовать их как основу расчета. Если ни масса, ни расход не указаны, необходимо предположить какое-то их значение.

С чистыми веществами работать приходится довольно редко, особенно в пищевой промышленности, и поэтому оказывается необходимым определить количество компонентов, входящих в состав того или иного материала. Один из наиболее часто применяемых методов — это метод массовых долей или  $x_i^j$ , где  $i$  относится к потоку, несущему определенное соединение, а  $j$  обозначает данное соединение. Массовая доля рассчитывается как отношение массы соединения к полной массе материала. Так, если материал состоит из 4 кг масла, 13 кг крахмала и 1 кг воды, массовая доля масла составляет  $4 : (4 + 13 + 1) = 0,22$ .

## 7.2 Материальные балансы

В этом разделе мы рассмотрим материальные балансы, использующие операции III категории, например, сортировку. Материальные балансы для операций IV категории (обжаривания, сушки, нагрева вдуванием пара и испарительного охлаждения) мы рассмотрим в разделе 7.4.

### 7.2.1 Общий массовый баланс

Материальный баланс всего технологического процесса получается как сумма материальных балансов каждой единичной операции. Для составления материального баланса необходимо выявить и определить все материальные потоки (с небольшими допусками). Основу для расчета полного массового баланса дает принцип сохранения массы, требующий, чтобы в заданный период времени все массы, поступающие в систему или выходящие из нее (переходящие через заданную границу системы), должны суммироваться с массой, находящейся в системе. Таким образом,

$$(\text{масса, входящая в систему}) - (\text{масса, выходящая из системы}) = - (\text{полная масса системы}). \quad (7.3)$$

Для иллюстрации простого массового баланса может быть использована операция сортировки. Дефектные материалы удаляют из потока вымытого и нарезанного продукта нужного размера еще до основных операций. В одном из методов сортировки используется высокоскоростной оптический контроль каждой частицы нарезанного продукта. Частицы продукта поступают в устройство для сортировки, где они интенсивно освещаются под диодной матрицей. Эти оптические датчики фиксируют спектр отраженного от материала луча света и посылают сигналы компьютеру, который сравнивает спектр со стандартным для допустимого цвета. Частицы со спектром, отличающимся от стандартного на заданную величину, удаляются из основного потока материала с помощью механических средств. Блок-схема такого процесса приведена на рис. 7.2. В общем случае скорость потока продукта к сортировочному устройству равна  $\dot{m}_{in} = dm_{in}/dt$ , скорость потока, выходящего из сортировочного устройства равна  $\dot{m}_{out} = dm_{out}/dt$ , а скорость потока дефектного материала равна  $\dot{m}_{def} = dm_{def}/dt$ . Масса продукта в сортировочном устройстве в любой момент определяется как  $\dot{m}_{sort} = dm_{sort}/dt$ .

В данном примере подача в сортировочную машину предполагается равной нулю (отключенное состояние) или с постоянным значением (рабочее состояние), равным



Рис. 7.2. Блок-схема, определяющая операцию оптической сортировки, где  $\dot{m}_{in}$  — подаваемый материал, кг/с;  $\dot{m}_{out}$  — выгружаемый проверенный материал, кг/с;  $\dot{m}_{def}$  — дефектный материал, кг/с;  $\dot{m}_{sort}$  — материал в сортировочном устройстве, кг

$\dot{m}_{in}$ . При постоянной скорости подачи  $\dot{m}_{sort}$  будет постоянной величиной, пропорциональной  $\dot{m}_{in}$ , поскольку сортировочная машина не предназначена для накопления продукта. Если весь продукт будет приемлем, величина  $\dot{m}_{out}$  будет постоянной и равной скорости подачи. Если в подаваемом материале дефектный продукт присутствует, сумма потоков  $\dot{m}_{out}$  и  $\dot{m}_{def}$  будет равна скорости подачи, что соответствует нормальной работе сортировочного устройства. Поток дефектного материала обычно составляет небольшую долю от потока подаваемого материала.

В уравнении (7.4) суммированы отмеченные выше условия, и оно иллюстрирует принцип сохранения масс. Система обозначений описывает потоки  $\dot{m}_{in}$  в сортировочное устройство (от 1 до  $L$ ) и потоки  $\dot{m}_{out}$  из сортировочного устройства (от 1 до  $M$ ) плюс потоки дефектного материала  $\dot{m}_{def}$  из устройства ( $\dot{m}_{sort}$  предполагается постоянной). Обратите внимание, что потоки дефектного материала могут быть использованы для получения *побочных продуктов* из различных фракций отходов.

$$\sum_{i=1}^{i=L} \dot{m}_{in,i} - \left( \sum_{j=1}^{j=M} \dot{m}_{out,j} + \sum_{k=1}^{k=N} \dot{m}_{def,k} \right) = 0. \quad (7.4)$$

## 7.2.2 Применение массовых балансов к переработке растительного и животного сырья

Удельные массовые расходы и материальные балансы необходимы при конструировании технологических установок, перерабатывающих растительное сырье на отдельные ингредиенты, для определения производительности оборудования, необходимых трудозатрат, водоснабжения и средств обработки отходов. Выход упакованного продукта на тонну растительного сырья (полный выход) — это информация из области массового баланса, имеющая первостепенную важность при конструировании технологической линии для обработки сезонных фруктов и овощей. Существуют справочные данные для перевода массы собранных фруктов и овощей в число ящиков с банками консервированных или замороженных фруктовых и овощных продуктов. Эти данные полезны в качестве первого приближения для проверки выходов, рассчитанных на основе материального баланса для любой проектируемой технологической линии. По этим данным может быть оценен объем побочного продукта и отходов.

Выход пищевого продукта зачастую является основой для оплаты сырья. Например, размер яблок и степень их повреждения непосредственно влияют на выход и стоимость свежих яблок при использовании их для получения консервированных яблочных ломтиков и пюре. Такие количественные корреляции были получены в классических исследованиях [14], увязывающих размер яблок и уровень их повреждений с количеством ящиков на выходе и трудозатратами на получение ломтиков или пюре. Были получены уравнения для связи качества сырья с ценами на него, что позволяет обеспечить работу технологических линий с их проектной производительностью и поддерживать расчетную прибыль на инвестированный капитал. В работе [9] было показано, как соотношение размера фасоли к диаметру стручка может быть использовано для предсказания качества обработанной закусочной фасоли и объемов выхода, а следовательно, для формирования основы для оценки стоимости сырья.

### 7.2.2.1 Очистка от кожуры (шелушение, лущение)

Ниже будет показано применение материального баланса к отдельным операциям очистки от кожуры (шелушения, лущения) растительных продуктов — фруктов, овощей и зерна. Для удаления внешнего слоя клеток, образующего кожуру, которая защищает внутреннюю съедобную ткань, применяются несколько методов — пар высокого давления, замораживание, щелочные растворы (например, едкий натр) и механические способы (резка, шлифование или размалывание).

Помол пшеницы для получения муки, содержащей почти чистый эндосперм (смесь крахмала и белка почти без отрубей, по массе составляющая около 75% массы пшеничного зерна), выполняется механическим «стиранием» слоя клеток отрубей для удаления их с мягкого эндосперма [21]. Для этого сначала проводится обработка (увлажнение) слоя клеток отрубей влагой, чтобы сделать его пластичным. Затем зерно проходит через драную систему с парами вальцов, имеющих горизонтальные зубья, идущие по длине вальцов. Вальцы в паре двигаются с несколько отличающимися скоростями, что позволяет срезать зерно пшеницы, когда оно проходит в зазоре между вальцами. Для стирания слоя отрубей с эндосперма используется ряд таких вальцов с постепенным уменьшением зазора. Между каждой парой вальцов для удаления фракции отрубей от муки происходит отсеивание. Так как мельница может производить до 500 т муки в день, увеличение выхода муки во втором знаке после запятой может быть значительным. Помол риса также требует аналогичного понимания материального баланса при каждой операции помола [21].

Химическое снятие шелухи (лущение) основано на применении щелочных веществ — например, раствора гидроксида натрия или калия регулируемой концентрации и температуры. Очищаемые продукты (например, картофель, свекла, морковь или помидоры) погружают в щелочной раствор на фиксированное время. Щелочь диффундирует сквозь слой кожуры к слою клеток, соединяющих кожуру со съедобным (пищевым) материалом. Диффузию можно увеличить при помощи смачивающего вещества, что облегчает проникновение щелочи сквозь природный защитный слой, обычно присутствующий на поверхности растительного сырья. Слой клеток, соединяющих кожуру с мякотью, под действием щелочи разрушается. Далее отделенная кожа может быть удалена механическими щетками и промыванием. Чтобы нейтрализовать остатки щелочи, пищевые продукты погружают в кислоту. Кожа, содержащая щелочь, и промывная вода образуют пульпу, которую после нейтрализации с помощью добавления кислоты или путем молочно-кислого брожения можно использовать как корм для животных.

Описанный выше процесс химического снятия кожуры включает четыре отдельных операции (рис. 7.3). Первая операция — это щелочная обработка подлежащего очистке сырья. В системе имеются потоки продукта и щелочи, поступающие в резервуар со щелочью, и поток продукта, содержащего щелочь, выходящий из резервуара.

В рис. 7.3 предполагается, что подлежащий очистке от кожуры пищевой материал и резервуар со щелочью находятся при комнатной температуре. Подробный анализ химической очистки от кожуры содержится в работе [11] по сухой щелочной очистке картофеля. Вторая операция — это теплоперенос для нагрева продукта до температуры, при которой щелочь будет быстро диффундировать и разрушать клетки, соединяющие кожуру со съедобной частью. Третья операция — это механическое

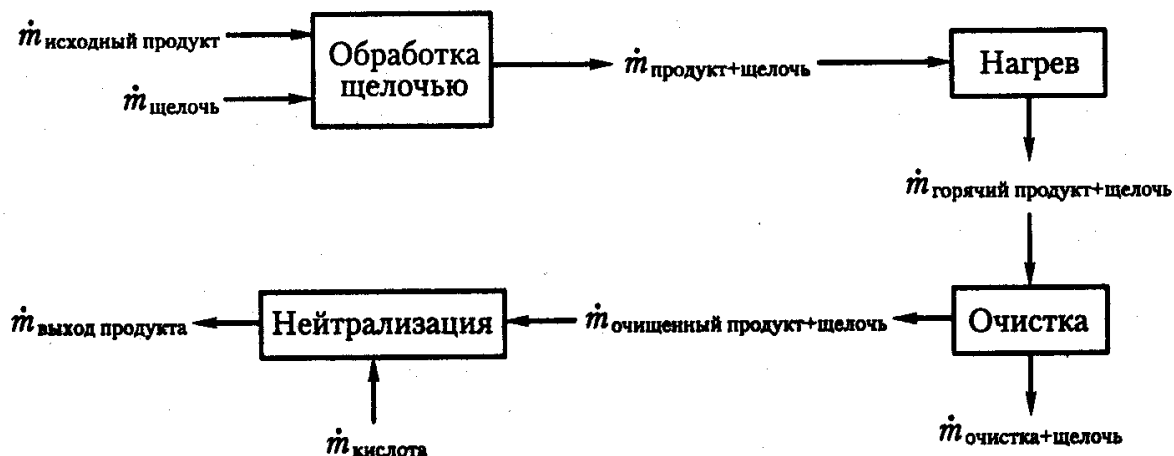


Рис. 7.3. Блок-схема химического снятия кожуры с фруктов и овощей, где  $\dot{m}$  — удельный массовый расход (кг/с) соответствующего потока

удаление кожуры, а четвертая — это стадия нейтрализации. Первая и вторая стадии зачастую выполняются одновременно с помощью нагретой щелочи. Аналогично стадии три и четыре могут выполняться в одной машине для снятия кожуры с использованием нейтрализующего аэрозоля непосредственно перед выгрузкой снятой кожуры из машины. Принимая, что работа идет в установившемся режиме, можно составить уравнения полного материального баланса и применить их к каждой отдельной операции или их комбинации. Ниже приведены уравнения общего массового и компонентного баланса.

Общий массовый баланс

$$\sum_{i=1}^{i=N} \dot{m}_i = \sum_{j=1}^{j=M} \dot{m}_j, \quad (7.5)$$

где  $N$  — число поступающих в данный процесс потоков;  $M$  — число выходящих потоков.

Уравнение (7.5) может быть применено к любой системе, работающей в установившемся режиме.

Компонентный массовый баланс

$$\sum_{i=1}^{i=N} x_i^k \dot{m}_i = \sum_{j=1}^{j=M} x_j^k \dot{m}_j, \quad (7.6)$$

где  $k$  — отдельный компонент потоков  $i$  и  $j$ .

Согласно уравнению (7.6) масса некоторого компонента, входящего в систему, должна быть равна массе, выходящей из системы.

Обычно целью технологического процесса является получение максимального выхода пищевого продукта, и поэтому для достижения высокого коэффициента  $\dot{m}_{\text{продукта}} / \dot{m}_{\text{сырья}}$  на входе каждая из четырех отдельных операций снятия кожуры должна быть оптимизирована. Оптимизации процесса можно достичь с помощью следующих мер:

- разделение процесса на отдельные операции;
- установление границ каждой операции для определения системы;

- проверка границы системы для определения всех материалов *на входе* и их удельных массовых расходов;
- проверка границы системы для определения всех материалов *на выходе* и их удельных массовых расходов;
- при установившемся режиме работы системы — определение массы материала в пределах границ системы.

Для единичной операции, цель которой — приведение продукта в контакт со щелочью, для любой заданной скорости постоянного потока продукта в систему, где происходит контакт, массовый расход щелочи будет пропорционален ее количеству, поглощенному продуктом. Увеличение концентрации и/или увеличение времени контакта могут увеличить поглощение щелочи. Для фиксированного потока продукта единственный способ увеличить время контакта — это увеличение размера оборудования, в котором этот контакт происходит, а это приведет к увеличению массы в системе. Скорость проникновения щелочи в продукт путем диффузии зависит от многих факторов (физических свойств продукта, поверхностной концентрации, времени контакта, механического перемешивания и температуры).

Кроме максимизации выхода съедобного материала путем минимизации удаления избыточной кожуры, процесс щелочного снятия кожуры должен минимизировать использование щелочи. Процесс должен обеспечивать точный контроль диффузии щелочи путем покрытия подлежащего очистке продукта контролируемым количеством щелочи. В четырехстадийном процессе продукт, покрытый холодной щелочью, подвергается нагреву для быстрого увеличения температуры поверхности при концентрировании щелочи на поверхности методом выпаривания. Точно в момент, когда клетки, удерживающие кожуру, разрушаются, кожура с пищевой тканью может быть удалена механически. И, наконец, с помощью щеток на продукт может быть нанесено небольшое количество воды, содержащей пищевую кислоту (для нейтрализации оставшейся щелочи). Смесь кожуры и щелочи удаляется в виде концентрированной пульпы (отсюда название четырехстадийная «сухая щелочная очистка»), которая может быть сброжена в корм для животных или использована с помощью ферментативного осахаривания в качестве источника ферментируемых углеводов.

Высокая стоимость едкого натра и проблемы с удалением высоких концентраций натрия из содержащих щелочь отходов стимулировали использование для снятия кожуры пара высокого давления. Высокие температуры размягчают клетки, связывающие кожуру с пищевой тканью картофеля, других корнеплодов и помидоров, примерно так же, как и при химическом снятии кожуры. Краткое воздействие насыщенного пара с температурой до 150 °C ослабит кожуру достаточно, чтобы сделать возможным ее механическое удаление. Небольшое количество промывной воды в соединении с механической очисткой удаляет любые остатки кожуры. Удаленная кожура и промывная вода могут перекачиваться для хранения и использоваться на корм животным без дополнительной обработки.

Очистка от кожуры с использованием для теплопереноса пара, инфракрасного излучения или открытого пламени состоит из двух отдельных операций: первая связана с энергетическим балансом (см. раздел 7.3); вторая — это механическое удаление отделившейся кожуры, и она подобна операции, применяемой при химическом ее снятии. Кислотного промывания при этом не требуется.



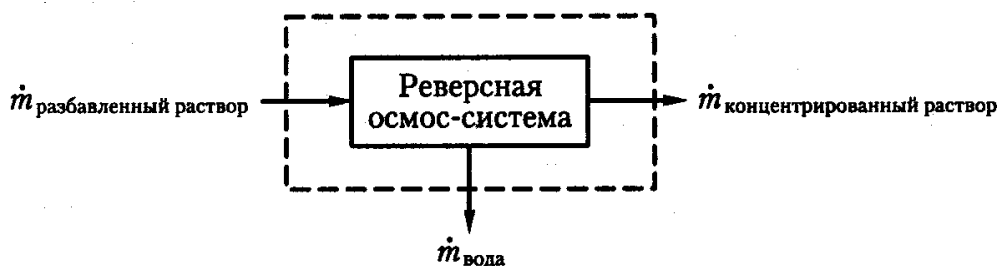


Рис. 7.4. Материальные балансы для обратного осмоса разбавленных жидких пищевых продуктов

### 7.2.2.2 Мембранное отделение и противоточная экстракция

Для концентрирования разбавленных жидких пищевых продуктов, а также для получения растворенных или взвешенных пищевых компонентов (например, крахмалов, сахаров и белков) могут быть использованы мембраны. Для удаления воды и других соединений с низким молекулярным весом, а также ионов из разбавленных жидких пищевых продуктов были разработаны и другие методы — от опреснения морской воды способом обратного осмоса до удаления алкоголя из вина или пива для получения слабоалкогольных напитков [5]. Разбавленный пищевой продукт может быть сконцентрирован способом обратного осмоса путем «проталкивания» содержащейся в пищевом продукте воды через мембрану, способную удерживать все соединения, молекулярный вес (размер молекулы) которых немного больше, чем у воды. Жидкость прокачивается через комплект мембран заданной площади. При давлении немного больше осмотического давления системы, зависящем от химического состава и степени концентрации системы, вода начнет вытекать через мембрану со стороны низкого давления. Скорость потока будет функцией от уровня концентрации системы и уменьшается при любом химическом или механическом воздействии на мембрану, оказываемом пищевым продуктом. Детальный анализ концентрирования с помощью мембран содержится в работе [17]. При увеличении концентрации растворенных веществ для поддержания постоянной скорости прохождения (расхода) воды через мембрану в системе требуются более высокие давления.

В другом варианте с одной стороны мембраны помещают разбавленную жидкость, а с другой — концентрированный раствор. При этом вода, диффундирующая через мембрану со стороны разбавленной жидкости, будет осмотически поглощаться концентрированным раствором на другой стороне. Этот процесс, называемый *прямым осмосом*, полезен для концентрирования разбавленных пищевых взвесей (пульп), которые могут засорить мембраны для обратного осмоса и потребовать избыточно высокого давления прокачивания в системах обратного осмоса. Растворы сахара или соли используются в концентрированном виде и могут быть доведены до необходимой концентрации стандартными средствами для концентрирования выпариванием. На рис. 7.4 и 7.5 показан материальный баланс для обратного и прямого осмоса соответственно.

Для отделения растворимой составляющей пищевых продуктов из нерастворимой матрицы используются непрерывное экстрагирование с противотоком и однократное периодическое экстрагирование. Экстрагирующей средой обычно служит вода, но для экстрагирования вкусовых/ароматических составляющих может ис-

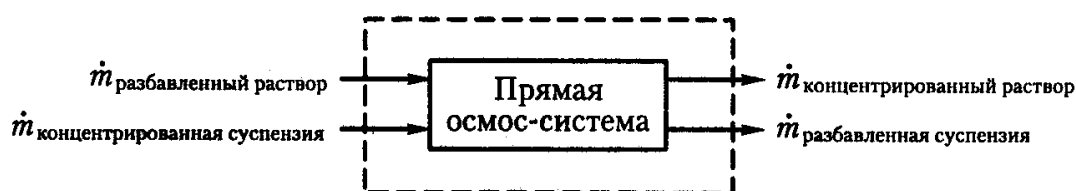


Рис. 7.5. Материальные балансы для концентрирования разбавленных жидких пульп пищевых продуктов с помощью прямого осмоса

пользоваться алкоголь, для извлечения растительного масла — гексан, а для удаления кофеина из кофе и чая или аромата из сухого хмеля — газы в надкритическом состоянии (например, углекислый газ).

В момент сбора урожая в сахарной свекле содержится до 20% сахарозы. Из сахарной свеклы ее можно извлечь, помещая свекольную стружку (при минимальном повреждении клеток) для максимального увеличения поверхности в противоток чистой воды [2].

При движении сахарной свеклы против потока воды последняя обогащается сахаром, а ткань свеклы — водой. Материальный баланс системы, определенной как «нерастворимая масса стружки сахарной свеклы», в любой момент процесса экстракции с противотоком сводится к двум веществам, поступающим в данную систему, и двум веществам, выходящим из нее. На рис. 7.6 приведен материальный баланс нерастворимой стружки сахарной свеклы при начальном смешивании и отделении.

Этот процесс может быть повторен несколько раз до достижения нужного уровня извлечения сахарозы из свекольной пульпы. Концентрация сахарозы в воде, выходящей из диффузора, будет ниже концентрации сахара в свежей свеколовичной стружке, однако простой материальный баланс системы противоточного диффузора как целого может дать общее отношение воды к свекольной стружке. Предположим, что каждый час в диффузор поступает 100 частей свекольной стружки. Если каждый час с противоположной стороны диффузора поступает 100 частей чистой воды и если из свекольной стружки полностью удаляется сахароза, концентрация сахарозы в воде, выходящей из диффузора, равна:

$$x_{\text{воды,вых}}^{\text{сахар}} = \frac{\text{масса сахара в жидком экстракте}}{\text{общая масса жидкого экстракта}} = \frac{x_{\text{свеклы,вых}}^{\text{сахар}} \dot{m}_{\text{свеклы,вх}}}{x_{\text{свеклы,вых}}^{\text{сахар}} \dot{m}_{\text{свеклы,вх}} + \dot{m}_{\text{воды,вх}}}$$

и тогда

$$x_{\text{воды,вых}}^{\text{сахар}} = \frac{(0,20) (100 \text{ частей свеклы})}{(0,20) (100 \text{ частей свеклы}) + (100 \text{ частей воды})} = 0,167.$$

В эффективном противоточном диффузоре для сахарной свеклы концентрация сахара в экстрагирующей воде на последней стадии может достигать 16,7% (если свеколовичная стружка не набирает воду при извлечении сахара). Точное количество воды, удерживаемой свеколовичной стружкой, может быть определено с помощью анализа. Если свеколовичной стружкой удерживается значительное количество воды, то для возврата чистой воды в систему может быть использовано механическое прес-

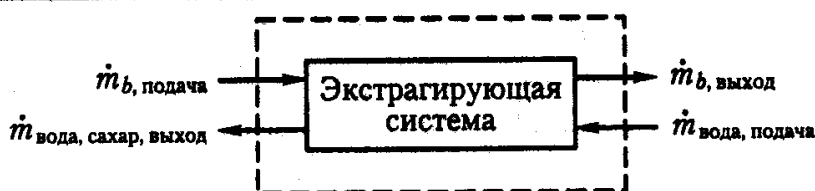


Рис. 7.6. Материальный баланс системы «стружка сахарной свеклы» на первой стадии при противоточном экстрагировании сахара

сование. Спрессованная свекловичная стружка может быть использована в качестве корма для животных или для переработки в побочные продукты.

В работе [6] описана конструкция уникального противоточного экстрактора для получения фруктовых и овощных соков из свежих яблок, груш, клюквы, помидоров и другого сырья. В этой системе был использован перфорированный винтовой конвейер для перемещения продукта против потока теплой воды в лотке с рубашкой. Винтовой конвейер приводится в движение двигателем, который может быть запрограммирован на поворот винта на  $N$  оборотов вперед, а затем — на  $N - 1$  поворотов назад, что препятствует движению подвергающейся экстракции тонкой стружки вместе с винтом (шнеком). В обычных устройствах для противоточной экстракции с одним или двумя винтами пищевые материалы имеют тенденцию прилипать к шнеку. Реверсивное движение обеспечивает смешивание на каждом шаге шнека и дает крайне высокую эффективность контакта в данном объеме установки.

В противоточном экстракторе находится значительное количество материала, которое пропорционально скорости диффузии растворимого компонента из пищевого сырья. Как и в процессах обратного и прямого осмоса скорость диффузии зависит от размеров частиц продукта, температуры, интенсивности перемешивания и концентрации [12].

### 7.2.3 Выводы

В данном разделе мы рассмотрели некоторые материальные балансы — от простых процессов смешивания до регулируемых технологических процессов, зависящих от диффузии. Простота материального баланса подчеркивает его полезность для анализа потоков продукта, поступающих на любую конкретную операцию и выходящих после нее. Примеры, используемые в этом разделе, были отобраны так, чтобы подчеркнуть необходимость тщательного определения границ системы, в которой перемещаются потоки масс. В некоторых случаях для понимания явлений переноса, которые могут определять *скорость* операции, может оказаться желательным отделить материальный баланс системы от энергетического. Еще раз следует отметить, что материальный и энергетический балансы не связаны с механизмами тепло- и массопереноса, а используются для измерения количества энергии/материала или скорости их потока через границу системы в заданный момент времени. Когда эти величины известны, на основе детальной информации о скоростях реакций (например, скорости инаktivации термостойких патогенных микроорганизмов или скорости диффузии сахара из ломтиков фруктов) можно определить производительность промышленного обрабатывающего оборудования.

## 7.3 Энергетические балансы

Материальный и энергетический балансы составляются для того, чтобы разобраться с потоками массы и энергии в системе и идентифицировать потенциальные зоны сохранения или увеличения выхода. Энергетические балансы составляются для расчетов потоков энергии, поступающих в определенный процесс и выходящих из него. Эта информация в сочетании с материальным балансом позволяет определить полную энергию, требуемую данной системой. К типичным процессам, где применяются энергетические балансы, относятся:

- замораживание/оттаивание (энергия, требуемая для замораживания/размораживания определенного количества материала от начальной до конечной температуры);
- бланширование (энергия, требуемая для бланширования брокколи с необходимой скоростью);
- перекачивание (размеры насоса, необходимого для перекачивания 300 л/мин жидкости из резервуара в линию розлива);
- охлаждение (холодопроизводительность, необходимая для поддержания замороженного состояния при хранении).

С помощью энергетических балансов можно ответить на эти и многие другие практические вопросы.

### 7.3.1 Определения используемых терминов

Как показано в разделе 7.1.6, система определяется как некоторая область в пространстве или некоторая масса вещества. Поверхность раздела между системой и ее окружением называют *границей*. Граница может быть реальной (например, стенки бланширователя) или воображаемой (включающей, например, бланширователь и морозильную камеру). Система также может быть определена как открытая или закрытая — открытая система разрешает обмен массы с окружающей средой, а закрытая — нет.

Свойства системы можно описать как *интенсивные* (например, давление, плотность или температура) или *экстенсивные* (например, объем, масса или количество в молях). Интенсивные свойства, в отличие от экстенсивных, не зависят от количества материала в системе. Условия, в которых находится система или ее компоненты, называются *состоянием*; оно связано с интенсивными свойствами, то есть с температурой, давлением, фазовым состоянием вещества и его составом.

Энергетические балансы основаны на сохранении энергии или на первом начале термодинамики, утверждающем, что энергия не может быть ни создана, ни уничтожена. Первое начало термодинамики аналогично закону сохранения масс, упомянутому в предыдущем разделе, и поэтому дает сходные уравнения, известные как *полный энергетический баланс*:

$$\begin{aligned} & (\text{полная энергия, поступающая в систему}) - \\ & - (\text{полная энергия, выходящая из системы}) = \\ & = (\text{полная энергия, накопленная в системе}). \end{aligned} \tag{7.7}$$

Обратите внимание, что если система находится в установившемся состоянии, то полная накопленная энергия равна нулю, и тогда

$$\begin{aligned} & (\text{полная энергия, поступающая в систему}) = \\ & = (\text{полная энергия, выходящая из системы}). \end{aligned} \quad (7.8)$$

Система может обладать тремя формами энергии — *кинетической* ( $KE$ ), *потенциальной* ( $PE$ ) и *внутренней* ( $U$ ). Кинетической энергией система обладает благодаря своему движению, например, энергия текущей по трубе воды, и рассчитывается как

$$KE = \frac{mv^2}{2}. \quad (7.9)$$

Потенциальную энергию иногда называют накопленной энергией, и она определяется положением системы (вода в резервуаре на стойках обладает потенциальной энергией) или положением системы относительно состояния ее равновесия (закрученная резиновая лента). Потенциальная энергия вычисляется по формуле:

$$PE = mgh. \quad (7.10)$$

И, наконец, внутренняя энергия обусловлена случайным движением молекул рассматриваемого вещества, которое может быть результатом тепловых, химических, молекулярных или ядерных процессов.

Сумма указанных трех форм энергии представляет собой *полную энергию* системы  $E$ , которая может накапливаться.

Энергия может пересекать границу системы. Такой тип энергии представляют собой *тепло*  $Q$  и *работа*  $W$ . Теплоперенос является результатом различия температур между системой и ее окружением и может осуществляться в виде теплопроводности, конвекции и/или излучения.

Приняв индекс 1 для обозначения начальных (или входных) условий, а индекс 2 — для конечных (или выходных) условий, полный энергетический баланс некоторой системы может быть записан в следующем виде [10]:

$$Q + W + U_1 + KE_1 + PE_1 = U_2 + KE_2 + PE_2. \quad (7.11)$$

Обратите внимание, что  $Q$  положительно, когда тепло подводится к системе (добавляется), а  $W$  положительно, если работа выполняется относительно окружения, и отрицательна, если работа выполняется относительно системы. Уравнение 7.11 может быть преобразовано для *изменения* энергии системы в вид

$$Q + W = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE. \quad (7.12)$$

Уравнение (7.12) — основная форма первого начала термодинамики. Важно отметить, что в закрытой системе работа выполняется путем перемещения границы системы против действия противодействующей силы. Например, это может быть движение поршня в цилиндре (работа является результатом изменения давления или объема), вала, поворачивающего лопасть мешалки (работа является результа-

том трения и молекулярного движения), или генерация электрического тока или потока излучения, проходящих через границу системы. Если описанные явления отсутствуют, то  $W = 0$ . В открытой системе по определению масса проходит через границу системы вследствие совершения *работы вала*  $W_s$  или *работы потока*  $W_f$ . Работа вала передается текучей среде (жидкости) в системе механическими средствами, например, турбиной. Работа, выполненная над жидкостью от ее входа в систему до ее выхода — это работа потока [10]:

$$W_f = P_1 \dot{V}_1 - P_2 \dot{V}_2 = \Delta P \dot{V}, \quad (7.13)$$

где  $P$  — давление;  $\dot{V}$  — объемный расход потока; индексы 1 и 2 обозначают входное и выходное положения соответственно.

Таким образом, работа в открытой системе выражается как  $W = W_s + W_f$ , что приводит к уравнению:

$$Q + W_s + W_f = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE \quad (7.14)$$

или

$$Q + W_s + \Delta(PV) = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE. \quad (7.15)$$

Энтальпия  $H$  системы определяется как [29]

$$H = U + PV \quad (7.16)$$

или

$$\Delta H = \Delta U + \Delta(PV). \quad (7.17)$$

Подстановкой формулы (7.17) в (7.15) получаем основу для большинства расчетов энергетического баланса открытой системы в равновесном состоянии:

$$Q + W_s = \Delta H + \Delta KE + \Delta PE. \quad (7.18)$$

Если в рассматриваемом процессе не происходит изменений кинетической и потенциальной энергии и нет работы вала, то уравнение (7.18) преобразуется [29] в

$$Q = \Delta H. \quad (7.19)$$

Это служит исходной точкой для большинства расчетов энергетических балансов, затронутых в данной главе. Процессы, в которых задействованы потенциальная энергия потока (и, следовательно, работа вала) и кинетическая энергия, рассматриваются в главе 1.

### 7.3.2 Энтальпия

Абсолютное значение энтальпии  $H$  некоторого вещества измерить невозможно, но можно измерить ее изменение, соответствующее изменению состояния вещества, участвующего в процессе. Поэтому необходимо знать *исходное состояние*, а измеря-

емой величиной является изменение энтальпии между этим исходным и интересующим нас состояниями. *Исходное состояние* выбирается произвольно, зачастую в зависимости от доступности данных и простоты расчета.

Рассматривая уравнение 7.19, можно видеть, что изменение энтальпии — это просто изменение теплосодержания. При обработке пищевых продуктов встречаются два его вида: *ощутимая теплота* и *скрытая теплота*. Увеличение ощутимой теплоты ведет к увеличению температуры вещества в системе [29]

$$\Delta H = Q = m \int_{T_1}^{T_2} c_p dT, \quad (7.20)$$

где  $m$  — масса вещества, кг;  $T_1$  и  $T_2$  — начальная и конечная температуры, °C;  $c_p$  — *удельная теплоемкость* вещества, кДж/(кг · °C).

Принимая для определенного диапазона температур  $c_p$  постоянной и интегрируя уравнение 7.20, получим

$$\Delta H = Q = mc_p(T_2 - T_1), \quad (7.21)$$

где  $c_p$  — удельная теплоемкость вещества в определенном диапазоне температур.

Изменения энтальпии, затрагивающие скрытую теплоту, происходят из-за изменения фазового состояния вещества (например, таяние льда) при постоянной температуре. Скрытая теплота плавления  $\Delta H_f$  связана с плавлением, а скрытая теплота парообразования  $\Delta H_v$  — с парообразованием.

### Пример 7.3

Написать общее уравнение, описывающее полное изменение энтальпии для нагревания массы льда до пара, с использованием процесса, показанного на рис. 7.7.

Из рис. 7.7 ясно, что этот процесс может быть разделен на пять отдельных стадий, состоящих из ощутимого нагревания (отрезки  $ab$ ,  $cd$  и  $ef$ ) и поглощения скрытой теплоты ( $bc$  и  $de$ ). Сумма энергий, необходимых для каждой из этих стадий, представляет собой полную энергию, требуемую для данного процесса. Это описывается следующим уравнением:

$$\Delta H_t = mc_{p,\text{лед}}(T_b - T_a) + m\Delta H_{b,c,\text{пл}} + mc_{p,\text{вода}}(T_d - T_c) + m\Delta H_{d,e,\text{парообр.}} + m\Delta H_{e,f,\text{пар.}}(T_f - T_e).$$

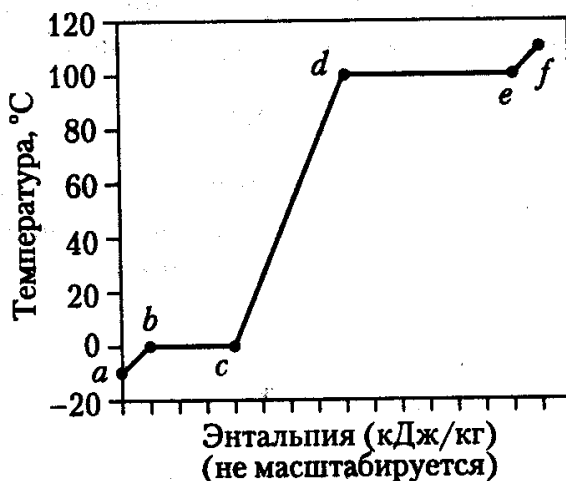


Рис. 7.7. График связи температуры и энтальпии для превращения льда в перегретый пар. По [29]

Этот подход может быть также использован для пищевых продуктов, если известны значения необходимых параметров. Сведения о теплофизических свойствах некоторых материалов приведены в главе 11.

### 7.3.3 Составление энергетических балансов: общий метод

Энергетический баланс можно составить как для существующего, так и для теоретического технологического процессов. В первом случае он служит для определения энергетики неизвестных потоков и эффективности технологического процесса, а во втором — чтобы помочь сконструировать и определить размеры источников энергии (котлов, паропроводов или электропроводки). В обоих случаях технологический процесс можно разделить на последовательные стадии, как это делается для материальных балансов. Проиллюстрировать данный метод можно следующим образом.

#### *Пример 7.4. Косвенный нагрев паром: работа трубчатого теплообменника с параллельным потоком*

Молоко должно подвергаться ультравысокотемпературному нагреву УНТ с помощью трубчатого теплообменника с параллельным потоком. Жидкое (питьевое) молоко с низким содержанием жира (2%) должно производиться со скоростью 5000 кг/ч при времени воздействия 2 с и температуре 150 °С. Молоко при начальной температуре около 15 °С подается в теплообменник; в качестве теплоносителя используется 100%-ный пар под давлением 543,1 кПа. Конденсат выходит из конденсационного горшка при 155 °С. Какова необходимая скорость потока к теплообменнику? Состав молока с низким содержанием жира (2%): 89,2% влаги; 3,3% белка; 2% жира; 4,8% углеводов; 0,7% золы.

Следующее решение иллюстрирует последовательный метод, который может быть использован в большинстве расчетов энергетического баланса:

#### *1. Построение блок-схемы процесса и нанесение обозначений (рис. 7.8)*

Постройте блок-схему технологического процесса и нарисуйте границу (обозначенную пунктирной линией), отделяющую собственно систему от ее окружения. На этой блок-схеме необходимо обозначить все известные и неизвестные потоки материала и энергии, как входящие в систему, так и выходящие из нее. Обозначения должны отражать фазовое состояние материала (твердое, жидкое или парообразное) — например,  $H_2O(тв.)$  для льда или  $H_2O(п)$  для пара, если это не ясно само по себе.

#### *2. Определение удельной энтальпии каждого потока и его компоненты (при необходимости).*

*Исходное состояние: вода при 0 °С.*

*Энергия на входе:*

*Молоко:*

$$\Delta H_{M,I} = \dot{m}_M c_{p,M} (T_M - T_{ref}).$$

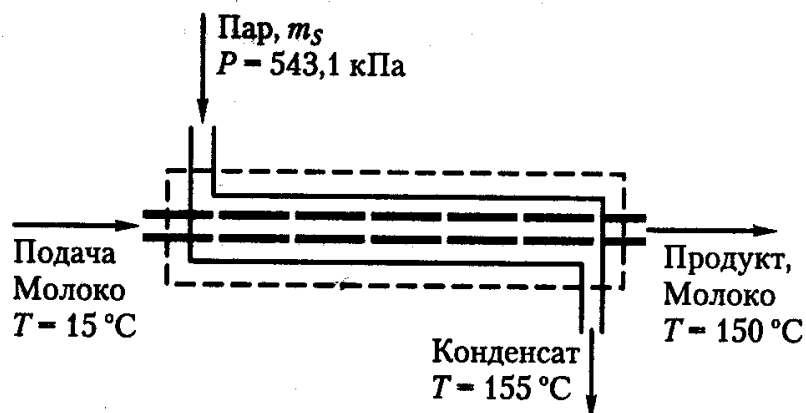


Рис. 7.8. Трубчатый теплообменник с параллельным потоком



Из уравнения 7.1 находим удельную теплоемкость:

$$c_p = [1,424 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})] \cdot 0,048 + [1,549 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})] \cdot 0,033 + [1,675 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})] \cdot 0,020 + [0,837 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})] \cdot 0,007 + [4,187 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})] \cdot 0,892 = 3,894 \text{ кДж}/\text{кг} \cdot ^\circ\text{C};$$

$$\Delta H_{M,I} = 5000 \text{ кг/ч} \cdot [3,894 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})] (15^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}) = 292\,050 \text{ кДж/ч}.$$

Пар:

$$\Delta H_S = \dot{m}_S H_S.$$

По таблицам водяного пара находим, что энтальпия пара  $H_v$  равна 2746,5 кДж/кг. Таким образом

$$\Delta H_S = \dot{m}_S \cdot 2746,5 \text{ кДж/кг}.$$

Энергия на выходе  
Молоко

$$\Delta H_{M,O} = 5000 \text{ кг/ч} \cdot [3,894 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})] (150^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}) = 2\,920\,500 \text{ кДж/ч}.$$

Конденсат

$$\Delta H_C = \dot{m}_C \cdot [4,18 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})] (150^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}) = \dot{m}_C \cdot 627 \text{ кДж/кг}.$$

3. Запишите соответствующие уравнения энергетического баланса и решите их в численном виде на требуемые количества

$$\Delta H_{M,I} + \Delta H_S = \Delta H_{M,O} + \Delta H_C$$

или

$$292\,050 \text{ кДж/ч} + \dot{m}_S \cdot 2746,5 \text{ кДж/кг} = 2\,920\,500 \text{ кДж/ч} + \dot{m}_C \cdot 627 \text{ кДж/кг}.$$

Используя  $\dot{m}_S = \dot{m}_C$  и решая относительно  $\dot{m}_S$ , получим

$$\dot{m}_S = 1240 \text{ кг/ч}.$$

Следовательно, для нагрева 5000 кг жидкого (питьевого) молока в час потребуются 1240 кг/ч пара. Обратите внимание, что конденсат, покидающий теплообменник при 155 °С, обладает значительной энергией, которая может быть использована.

### 7.3.4 Примеры отдельных операций и источники энергии

Ниже приведены примеры, отражающие разные задачи расчета энергетических балансов, с которыми может встретиться инженер на производстве. Хотя, конечно, рассмотреть все возможные технологические операции невозможно, в этих примерах содержится много сходных расчетов, которые могут быть применены к широкому диапазону ситуаций, хотя собственно технология или продукт могут отличаться.

#### Пример 7.5. Ощутимая теплота: периодическая тепловая обработка в автоклаве

Автоклав и 2000 банок мяса тунца равномерно нагреты до температуры 116 °С. Перед удалением банок из автоклава их необходимо охладить до 35 °С. Сколько необходимо воды для охлаждения, если она поступает в автоклав при 20 °С и выходит из него при 30 °С?

Дано:

Удельная теплоемкость мяса тунца  $c_p = 3,65 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$

Удельная теплоемкость стенок банки  $c_p = 0,46 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$

Удельная теплоемкость воды  $c_p = 4,18 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$

Масса мяса тунца в банке = 450 г

Масса одной пустой банки = 55 г

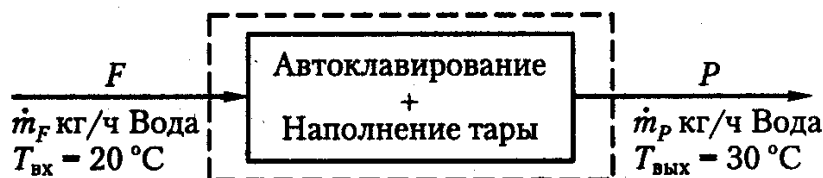


Рис. 7.9. Обработка консервированного мяса тунца в автоклаве

Энергия, необходимая для охлаждения автоклава = 75 000 кДж

Теплопотери через стенки автоклава принимаются пренебрежимо малыми.

**Решение**

1. Построить блок-схему данного процесса и нанести на нее данные. В данном случае задача очень проста, что отражено на рис. 7.9.

2. Определить энтальпию каждого потока:

$$\Delta H_F = Q_F = \dot{m}_F c_p (T_{in} - T_{ref});$$

$$\Delta H_P = Q_P = \dot{m}_P c_p (T_{out} - T_{ref}).$$

Общее изменение энтальпии воды равно

$$\Delta H_{\text{воды}} = Q_{\text{воды}} = \Delta H_P - \Delta H_F = \dot{m}_{\text{воды}} c_{p\text{воды}} (T_{out} - T_{in}),$$

или

$$Q_{\text{воды}} = \dot{m}_{\text{воды}} [4,18 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})] (30^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}).$$

Определим теплопотери автоклава, банок и мяса тунца

$$Q_{\text{автокл}} = 75\,000 \text{ кДж};$$

$$Q_{\text{банок}} = \dot{m}_{\text{банок}} c_{p\text{банок}} (T_{\text{нач}} - T_{\text{кон}});$$

$$Q_{\text{тунца}} = \dot{m}_{\text{тунца}} c_{p\text{тунца}} (T_{\text{нач}} - T_{\text{кон}}).$$

Общие теплопотери системы (автоклав, банки и мясо тунца)

$$Q_{\text{системы}} = 75\,000 \text{ кДж} + \dot{m}_{\text{банок}} c_{p\text{банок}} (T_{\text{нач}} - T_{\text{кон}}) + \dot{m}_{\text{тунца}} c_{p\text{тунца}} (T_{\text{нач}} - T_{\text{кон}}),$$

или

$$\begin{aligned} Q_{\text{системы}} = & 75000 \text{ кДж} + \left( 55 \frac{\text{г}}{\text{банка}} \right) (2000 \text{ банок}) \left( \frac{1 \text{ кг}}{1000 \text{ г}} \right) \left( 0,46 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \right) (116^\circ\text{C} - 35^\circ\text{C}) + \\ & + \left( 450 \frac{\text{г}}{\text{банка}} \right) (2000 \text{ банок}) \left( \frac{1 \text{ кг}}{1000 \text{ г}} \right) \left( 3,65 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \right) (116^\circ\text{C} - 35^\circ\text{C}); \\ Q_{\text{системы}} = & 345\,183,6 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

Решаем относительно требуемой массы воды путем приравнивания  $Q_{\text{воды}}$  и  $Q_{\text{системы}}$ :

$$Q_{\text{воды}} = Q_{\text{системы}};$$

$$\dot{m}_{\text{воды}} [4,18 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})] (30^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 345\,183,6 \text{ кДж};$$

$$\dot{m}_{\text{воды}} = 8258 \text{ кг}.$$

Обратите внимание, что хотя энергетический баланс позволяет рассчитать общее количество необходимой для охлаждения воды, он не определяет время, необходимое на проведение этого процесса. Примерное время можно оценить, используя расчеты теплопереноса при нестационарном состоянии [29].

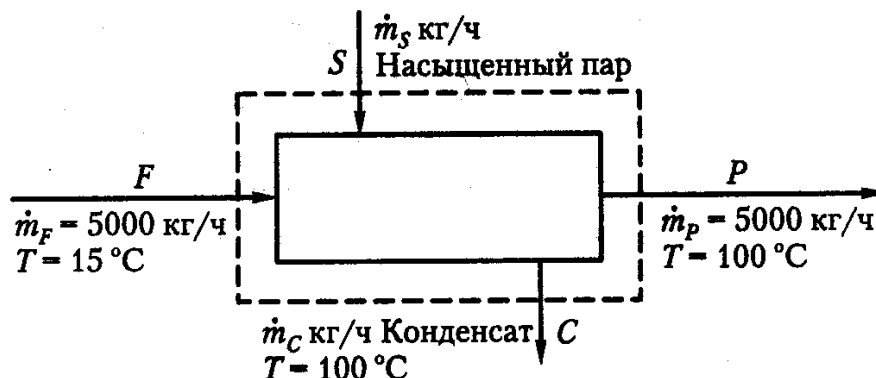


Рис. 7.10. Бланширование капусты брокколи

**Пример 7.6. Ощутимая теплота: непрерывное бланширование**

Туннельный бланширователь предназначен для обработки паром 5000 кг/ч нарезанной капусты брокколи при атмосферном давлении. Определить теоретическое потребление пара.

*Дано:*

Температура поступающей брокколи = 15 °C

Температура брокколи на выходе = 100 °C

Удельная теплоемкость брокколи  $c_p = 3,8$  кДж/(кг · °C)

Для теоретических расчетов принимается, что эффективность равна 100%.

*Решение:*

1. Построить блок-схему процесса и нанести на нее данные (рис. 7.10).

2. Определить энтальпию каждого потока.

Исходное состояние: температура воды 0 °C

$$\Delta H_F = Q_F = \dot{m}_{P,F} c_{p,F} (T_{in} - T_{ref});$$

$$\Delta H_P = Q_P = \dot{m}_{P,P} c_{p,P} (T_{out} - T_{ref});$$

$$\Delta H_S \approx \dot{m}_S \Delta H_{vap}.$$

Обратите внимание, что рассматривается только скрытая теплота парообразования, поскольку поток конденсата имеет на выходе температуру 100 °C и поэтому не сообщает системе ощутимого тепла.

3. Определить требуемый теоретический поток путем приравнивания энтальпий

$$\Delta H_P - \Delta H_F = \Delta H_S;$$

$$\dot{m}_{P,F} c_{p,F} (T_{out} - T_{in}) = \dot{m}_S \Delta H_{vap};$$

$$\left( 5000 \frac{\text{кг}}{\text{ч}} \right) \left( 3,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \right) (100^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C}) = \dot{m}_S \left( 2257 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \right);$$

$$\dot{m}_S = 716 \text{ кг/ч.}$$

Важно отметить, что в этом примере для расчета требуемого количества пара эффективность была принята равной 100%, хотя многие бланширователи обычно имеют эффективность лишь 10–30%. За дополнительной информацией по контролю энергии в пищевой промышленности рекомендуем обратиться к работе [27].

**Пример 7.7. Скрытая теплота: оттаивание и выпаривание**

Определить теплоту, необходимую для оттаивания 200 кг замороженного томатного сока, доведения этого сока до кипения и выпаривания из него 50 кг воды. Процесс происходит при атмосферном давлении; предполагается, что понижения точки замерзания или повышения точки кипения не происходит.

Дано:

Исходная температура замороженного сока =  $-10^{\circ}\text{C}$

Температура замерзания сока =  $0^{\circ}\text{C}$

Температура кипения сока =  $100^{\circ}\text{C}$

Удельная теплоемкость замороженного сока  $c_p = 2,01 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$

Удельная теплоемкость жидкого сока  $c_p = 3,98 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$

Скрытая теплота плавления  $\Delta H_{\text{fus}} = 333,2 \text{ кДж/кг}$

Скрытая теплота парообразования  $\Delta H_{\text{vap}} = 2257 \text{ кДж/кг}$

Решение:

1. Построить блок-схему процесса и нанести на нее данные. В данном случае полезнее составить схему процесса нагрева, а не реальной работы устройства.

Стадия 1: Изменение ощутимой теплоты от  $-10$  до  $0^{\circ}\text{C}$ .

Стадия 2: Скрытая теплота плавления при  $0^{\circ}\text{C}$  (оттаивание).

Стадия 3: Ощутимая теплота от  $0$  до  $100^{\circ}\text{C}$ .

Стадия 4: Скрытая теплота парообразования при  $100^{\circ}\text{C}$  (кипение).

2. Определить энергию  $Q$ , необходимую для каждой стадии.

Стадия 1:  $Q_1 = m_1 c_{p,1} (T_{\text{кон}} - T_{\text{нач}})$ .

Стадия 2:  $Q_2 = m_2 \Delta H_{\text{fus}}$ .

Стадия 3:  $Q_3 = m_3 c_{p,3} (T_{\text{кон}} - T_{\text{нач}})$ .

Стадия 4:  $Q_4 = m_4 \Delta H_{\text{vap}}$ .

3. Определить полную необходимую энергию, суммируя все стадии:

$$\begin{aligned} Q_{\text{полн}} &= Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = \\ &= m_1 c_{p,1} (T_{\text{кон}} - T_{\text{нач}}) + m_2 \Delta H_{\text{fus}} + m_3 c_{p,3} (T_{\text{кон}} - T_{\text{нач}}) + m_4 \Delta H_{\text{vap}} = \\ &= (200 \text{ кг}) \left( 2,01 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}} \right) [0^{\circ}\text{C} - (-10^{\circ}\text{C})] + (200 \text{ кг}) \left( 333,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \right) + \\ &\quad + (200 \text{ кг}) \left( 3,98 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}} \right) (100^{\circ}\text{C} - 0^{\circ}\text{C}) + (50 \text{ кг}) \left( 2257 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \right) = \\ &= 263\,110 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

Снова обратите внимание, что баланс не дает никакой информации о времени нагрева, в связи с чем вычисленное значение энергии относится к некоторому идеальному процессу. Приведенный выше метод расчета хорош для определения порядка величин для требуемой энергии, но более точный расчет должен включать потери в окружающую среду, понижение точки замерзания и повышение точки кипения (см. [30]).

### ПРИМЕР 7.8. Смешивание потоков с различными температурами

Горячий газ, состоящий из азота и кислорода с мольными долями соответственно 0,79 и 0,21, используется для нагревания воды в теплообменнике со стационарным потоком. В него поступает вода в жидком виде с расходом  $10 \text{ кг/с}$ , при  $15^{\circ}\text{C}$  и атмосферном давлении, а выходит из него в виде пара при  $200^{\circ}\text{C}$  и давлении  $1553,8 \text{ кПа}$ . Поток газа поступает при  $300^{\circ}\text{C}$  и давлении в 1 атм, а выходит при  $150^{\circ}\text{C}$  и 1 атм. Определить удельный массовый расход горячего газа, необходимо-го для данного процесса. Эффективность принимается равной 100%.

Решение:

1. Построить блок-схему процесса и нанести на нее данные (рис. 7.11).

Поток А, входящий газ:  $x_1 = 0,79 \text{ N}_2$ ,  $x_2 = 0,21 \text{ O}_2$ ,  $T_A = 300^{\circ}\text{C}$ .

Поток В, выходящий газ:  $x_1 = 0,79 \text{ N}_2$ ,  $x_2 = 0,21 \text{ O}_2$ ,  $T_B = 150^{\circ}\text{C}$ .

Поток С, входящая вода:  $10 \text{ кг/с}$ ,  $T_C = 15^{\circ}\text{C}$ .

Поток D, выходящий пар:  $10 \text{ кг/с}$ ,  $T_D = 200^{\circ}\text{C}$ .

2. Составить соответствующие уравнения энергетического баланса для энтальпии каждого потока.

Энергия, затраченная на охлаждение теплоносителя, ощутимое тепло:

$$\Delta H_{AB} = \dot{m}_G c_p (T_A - T_B).$$

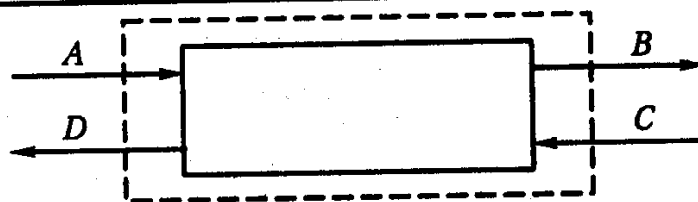


Рис. 7.11. Смешивание потоков при производстве пара

Энергия, полученная водяным паром, может быть определена с помощью таблицы значений для водяного пара:

$$\Delta H_{CD} = \dot{m}_w (\Delta H_{\text{vap}}^{200} - \Delta H_{\text{fp}}^{15}).$$

3. Решить численно относительно требуемых величин.

I. Определим изменение энтальпии воды.

$$\Delta H_{CD} = (10 \text{ кг/с})[(2793,22 - 62,99) \text{ кДж/кг}] = 27\,302 \text{ кДж/с}.$$

II. Определим  $c_p$  газа [10] при  $300^\circ\text{C}$  по следующим формулам:

$$c_p^T = \sum_{i=2}^n x_i c_{pi}^T \text{ и } \bar{c}_p = \frac{1}{n} \sum_{i=2}^n c_{pi}^T;$$

$$c_p^{300} = 0,79 \cdot [29,52 \text{ кДж/(моль} \cdot ^\circ\text{C)}] + 0,21 \cdot [42,10 \text{ кДж/(моль} \cdot ^\circ\text{C)}];$$

$$c_p^{300} = 32,16 \text{ кДж/(моль} \cdot ^\circ\text{C)};$$

$$c_p^{150} = 0,79 \cdot [29,26 \text{ кДж/(моль} \cdot ^\circ\text{C)}] + 0,21 \cdot [39,50 \text{ кДж/(моль} \cdot ^\circ\text{C)}];$$

$$c_p^{150} = 31,41 \text{ кДж/(моль} \cdot ^\circ\text{C)};$$

$$\bar{c}_p = \frac{32,16 + 31,41}{2} \frac{\text{кДж}}{\text{моль} \cdot ^\circ\text{C}} = 31,79 \frac{\text{кДж}}{\text{моль} \cdot ^\circ\text{C}};$$

$$\bar{c}_p = \left( 31,79 \frac{\text{кДж}}{\text{моль} \cdot ^\circ\text{C}} \right) \left( 31,373 \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \right)^{-1} = 1,01 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}.$$

III. Решить относительно удельного массового расхода потока газа, используя  $\Delta H_{AB} = \Delta H_{CD}$

$$\dot{m}_G [1,01 \text{ кДж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}](300^\circ\text{C} - 150^\circ\text{C}) = 27,302 \text{ кДж/с};$$

$$\dot{m}_G = 180 \text{ кг/с}.$$

## 7.4 Связанные материальные и энергетические балансы

Связывание массовых и энергетических балансов дополнительно усложняет вычисления, но задача расчета подобного связанного баланса — одна из наиболее полезных задач, причем часто встречающаяся. Расчет связанного баланса позволяет увязать подачу материала и нормы выхода с потреблением энергии в данном технологическом процессе. Естественно, что такой баланс становится полезным инструментом для определения эффективности данного процесса. Любой процесс, в котором одновременно происходит передача энергии, массы и момента, требует использования свя-

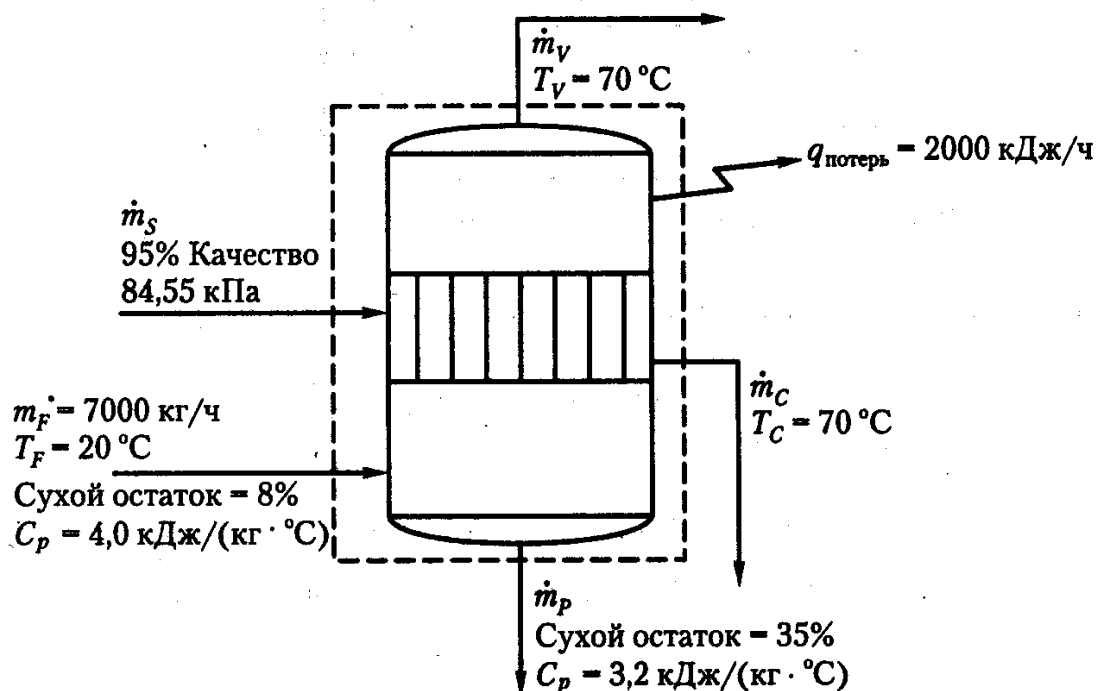


Рис. 7.12. Однокорпусный выпарной аппарат

занных материальных балансов. Примерами таких процессов могут служить сушка, выпаривание и сверхбыстрое охлаждение. При постановке и решении задачи по связанным массовым и энергетическим балансам используется процедура, подобная описанной в предыдущих разделах для несвязанных балансов, которая проиллюстрирована ниже на примере одноконтурного выпарного аппарата.

### Пример 7.9. Концентрирование сока в однокорпусном выпарном аппарате

Сок при 20 °C с содержанием сухих веществ 8% концентрируется в однокорпусном выпарном аппарате. Выпарной аппарат работает при разряжении, достаточном для испарения влаги при 70 °C, причем 95%-ный пар подается под давлением в 84,55 кПа (о качестве пара см. главу 6). Продукт поступает в выпарной агрегат со скоростью 7000 кг/ч. Небольшое количество энергии (2000 кДж/ч), выходит из выпарного аппарата в атмосферу как потери. Требуется рассчитать расходы продукта, пара, конденсата и испаряющейся влаги, а также экономию пара при процессе, когда конденсат выпускается при 70 °C. Удельная теплоемкость подаваемого продукта равна 4,0 кДж/(кг · °C), а сконцентрированного продукта — 3,2 кДж/(кг · °C). Влиянием повышения точки кипения сока при его конденсировании можно пренебречь (см. [30]).

**Решение:**

1. Построить блок-схему процесса и нанести на нее обозначения (рис. 7.12).
2. Составить уравнения массового и энергетического балансов для данного процесса. Полный массовый баланс, «масса на входе = масса на выходе» имеет вид:

$$\dot{m}_F + \dot{m}_S = \dot{m}_V + \dot{m}_P + \dot{m}_C$$

и

$$\dot{m}_S = \dot{m}_C,$$

так что

$$\dot{m}_F = \dot{m}_V + \dot{m}_P.$$

Баланс сухих веществ: «сухие вещества на входе» = «сухие вещества на выходе»

$$x_F^S \dot{m}_F = x_P^S \dot{m}_P.$$

Полный энергетический баланс: «энергия на входе» = «энергия на выходе»

$$q_F + q_S = q_V + q_P + q_C + q_{\text{lost}}$$

3. Определим энтальпию каждого потока.

Исходное состояние воды при температуре 0 °C

$$\begin{aligned} q_F &= \dot{m}_F c_p (T_F - T_{ref}) = \\ &= 7000 \text{ кг/ч} \cdot (4,0 \text{ кДж} \cdot \text{°C}) (20 \text{ °C} - 0 \text{ °C}) = 560\,000 \text{ кДж/ч}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_S &= \dot{m}_S [\Delta H_c^{110} + 0,95(\Delta H_V^{110} - \Delta H_c^{110})] = \\ &= \dot{m}_S [461,3 \text{ кДж/кг} + 0,95(2691,5 \text{ кДж/кг} - 461,3 \text{ кДж/кг})] = \dot{m}_S \cdot 2578 \text{ кДж/кг}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_V &= \dot{m}_V \Delta H_V^{70} = \\ &= 5400 \text{ кг/ч} \cdot 2626,8 \text{ кДж/кг} = 14\,184\,720 \text{ кДж/ч}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_P &= \dot{m}_P c_p (T_P - T_{ref}) = \\ &= 1600 \text{ кг/ч} \cdot [3,2 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C)}] (70 \text{ °C} - 0 \text{ °C}) = 358\,400 \text{ кДж/ч}; \end{aligned}$$

$$q_C = \dot{m}_C \Delta H_C^{70} = \dot{m}_C (292,98 \text{ кДж/кг});$$

$$q_{\text{lost}} = 2000 \text{ кДж/ч}.$$

4. Запишем соответствующие уравнения энергетического баланса и решим их в численном виде относительно требуемых количеств.

$$\begin{aligned} 560\,000 \text{ кДж/ч} + \dot{m}_S \cdot 2578 \text{ кДж/кг} &= 14\,184\,720 \text{ кДж/ч} + 358\,400 \text{ кДж/ч} + \\ &+ \dot{m}_C \cdot 292,98 \text{ кДж/кг} + 2000 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

Учитывая, что  $\dot{m}_S = \dot{m}_C$ , получим

$$\dot{m}_S = \dot{m}_C = 6120 \text{ кг/ч};$$

$$\text{Экономия пара} = \frac{\dot{m}_V}{\dot{m}_S} = \frac{5400 \text{ кг/ч}}{6120 \text{ кг/ч}} = 0,882.$$

Выпаривание широко применяется в пищевой промышленности для получения различных паст, пюре и соусов, включая апельсиновый сок, кленовый сироп и томатную пасту, что дает существенную экономию при транспортировке (масса и объем продукта значительно ниже массы и объема сырья). Достоинством выпаривания является также высокая эффективность — особенно при использовании многокорпусных выпарных аппаратов, рекомпрессии пара, а также при выпуске больших объемов продукта. Механизм выпаривания описан в работе [13], где для анализа эффективности, производительности и геометрии потоков использовалось численное моделирование.

Один из основных методов консервирования пищевых продуктов — это удаление воды из сырого или частично обработанного материала. Зачастую для получения необходимой информации требуется составление как массового, так и энергетического балансов (предыдущий пример с выпариванием). К другим способам удаления вла-

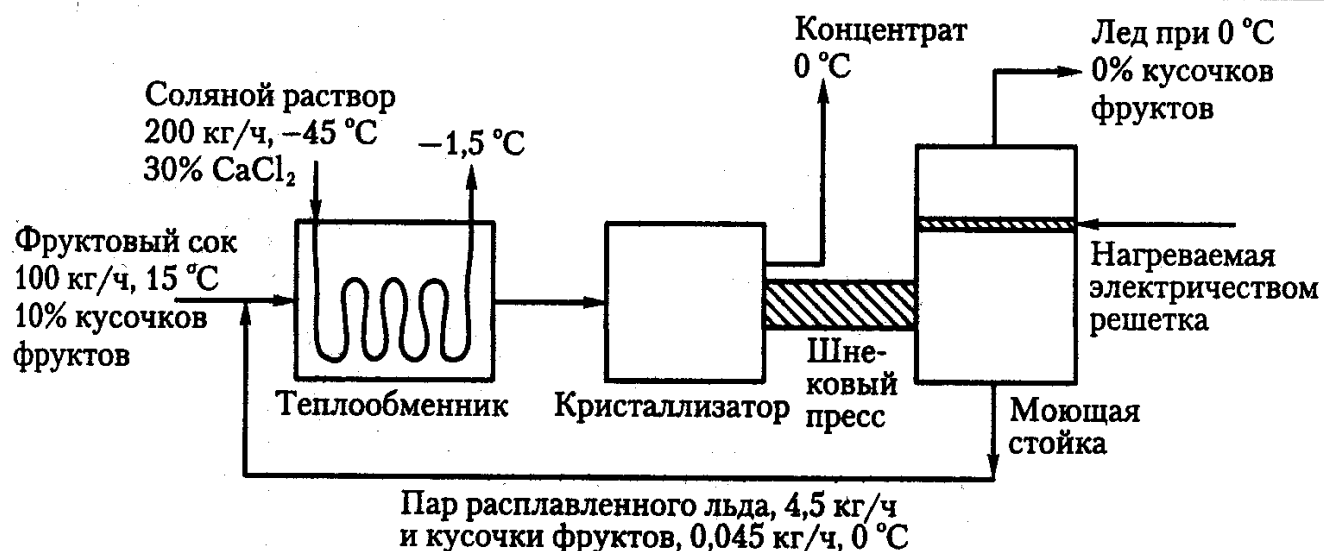


Рис. 7.13. Концентрирование фруктового сока

ги относятся различные виды сушки, мембранное фильтрование и концентрирование вымораживанием. Ниже для демонстрации связанных массовых и энергетических балансов, в которых происходит изменение агрегатного состояния вещества из твердого в жидкое, приведен пример использования концентрирования вымораживанием.

### Пример 7.10. Концентрирование фруктового сока вымораживанием

Фруктовый сок можно концентрировать, удаляя из него воду в виде льда (рис. 7.13). Охлаждение производится с помощью 30%-ного раствора  $\text{CaCl}_2$  и теплообменника. Кристаллы льда из кристаллизатора подают под давлением в промывную колонну, где 4,5 кг/ч льда тают и используются для смывания сухих веществ с поверхности других кристаллов перед повторной подачей на вход системы. Обратите внимание, что тепло поступает от решетки для электрического нагрева.

Принимая, что в систему из-за плохой теплоизоляции поступает 1960 кДж/ч, требуется рассчитать концентрацию твердых веществ, которую можно получить в потоке концентрата.

1. Построить блок-схему процесса и нанести на нее обозначения (рис. 7.14).

Нарисуем блок-схему процесса с границей (пунктирная линия), отграничив собственно систему и ее окружение. На схеме процесса должны быть обозначены все известные и неизвестные потоки материала и энергии, входящие в систему и выходящие из нее. Если требуется уточнение, обозначения должны отражать агрегатное состояние материала (твердое, жидкое или парообразное), например  $\text{H}_2\text{O}(\text{тв.})$  для льда или  $\text{H}_2\text{O}(\text{п})$  для пара. Обратите внимание, что может оказаться необходимым сначала составить материальный баланс для определения удельного массового расхода одного или нескольких потоков.

2. Определить удельную энтальпию каждого потока и его компонентов. Исходное состояние: 0 °C (лед)

Энергия на входе:

Подача

$$c_p = 1675 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}) + [0,025 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})] \cdot 90\% = 3,925 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C});$$

$$\Delta H_f = 100 \text{ кг/ч} \cdot [3,925 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})] (15^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}) + 90 \text{ кг/ч} \cdot (333,22 \text{ кДж/кг}) = 35\,877,3 \text{ кДж/ч}.$$

Рассол

$$c_p = 1,675 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}) + [0,025 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})] \cdot 70\% = 3,425 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C});$$

$$\Delta H_b = 200 \text{ кг/ч} \cdot [3,425 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})] (-45^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}) + 140 \text{ кг/ч} \cdot 333,22 \text{ кДж/кг} = 15\,825,8 \text{ кДж/ч}.$$

Утечка

$$\Delta H_1 = 1960 \text{ кДж/ч}.$$



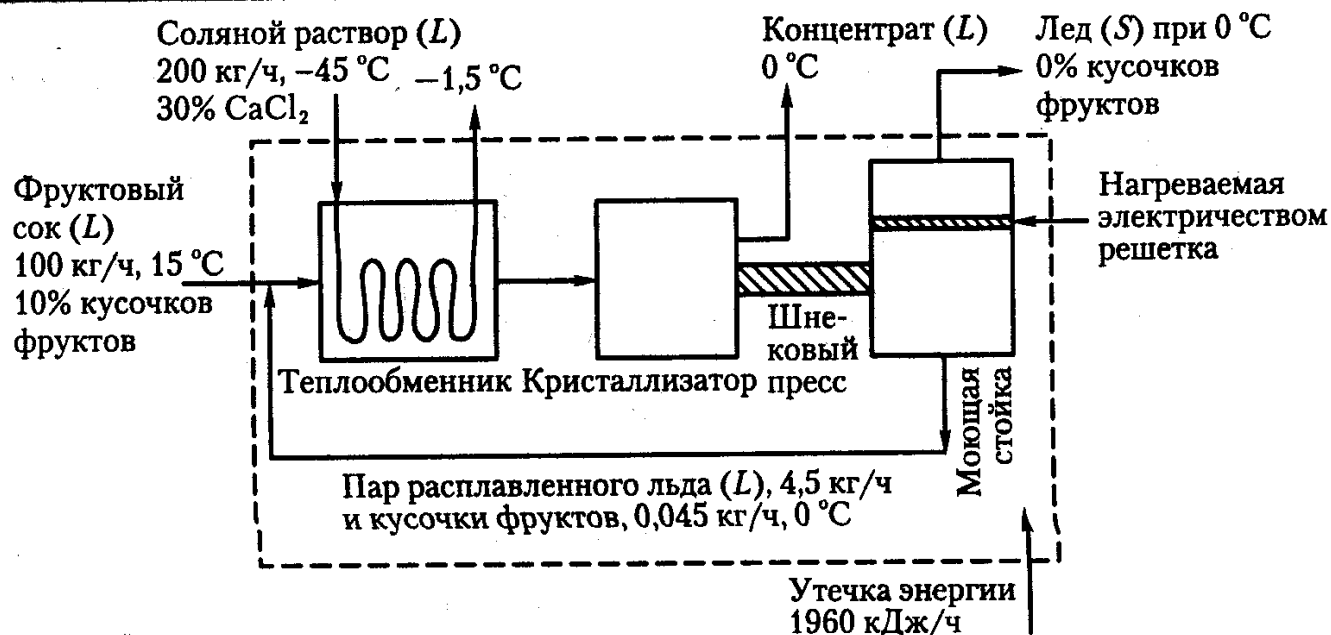


Рис. 7.14. Концентрация фруктового сока

Нагреватель

$$\Delta H_h = 4,5 \text{ кг/ч} \cdot 333,22 \text{ кДж/кг} = 1499,5 \text{ кДж/ч.}$$

Энергия на выходе:  
Рассол

$$\Delta H_b = 200 \text{ кг/ч} \cdot [3,425 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})] (-1,5^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}) + 140 \text{ кг/ч} \cdot 333,22 \text{ кДж/кг} = 45\,623,3 \text{ кДж/ч.}$$

Концентрат

Пусть  $m_w$  = масса воды в потоке концентрата; тогда

$$\Delta H_c = m_w \text{ кг/ч} \cdot 333,22 \text{ кДж/кг.}$$

Лед

$$\Delta H_i = 0 \text{ кДж/ч.}$$

3. Запишем соответствующие уравнения массового и энергетического балансов:

$$\Delta H_f + \Delta H_{b,in} + \Delta H_i + \Delta H_h = \Delta H_{b,out} + \Delta H_c + \Delta H_i$$

или

$$35\,877,3 \text{ кДж/ч} + 15\,825,8 \text{ кДж/ч} + 1960 \text{ кДж/ч} + 1499,5 \text{ кДж/ч};$$

$$45\,623,3 \text{ кДж/ч} + m_w \text{ кг/ч} \cdot 333,22 \text{ кДж/кг} + 0 \text{ кДж/ч.}$$

Решая относительно  $m_w$ , получим

$$m_w = 28,63 \text{ кг/ч.}$$

Следовательно,

$$x_s = \frac{10 \text{ кг СВ/ч}}{38,63 \text{ кг общ/ч}} = 0,259.$$

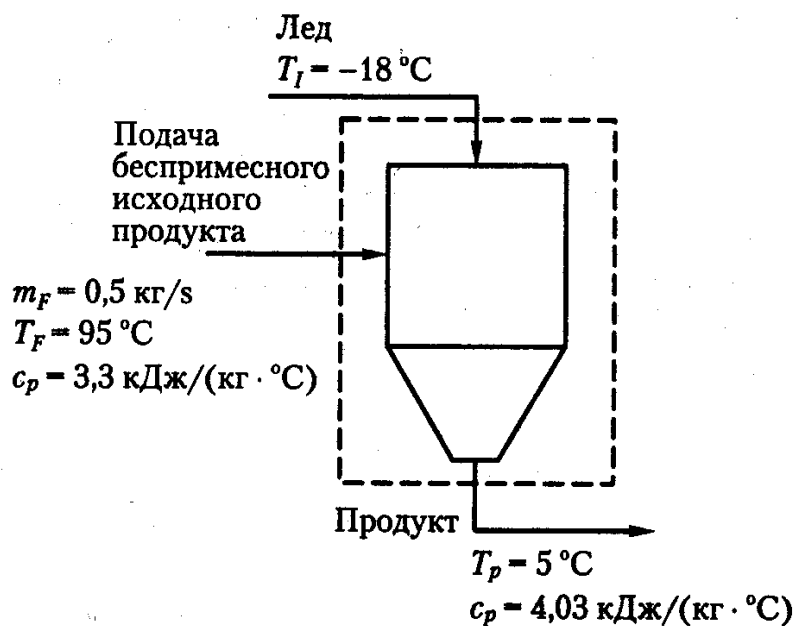


Рис. 7.15. Охлаждение фруктового пюре

Тепловая обработка пищевых продуктов требует их нагрева и выдержки при заданной температуре в течение определенного времени — например, при стерилизации в автоклаве и пастеризации. После применения тепловой обработки желательно как можно быстрее охладить продукт для минимизации потерь биологической и питательной ценности. Охлаждение можно выполнять разными способами, и выбор наилучшего зависит в основном от подлежащего охлаждению материала и/или его упаковки. Например, при стерилизации в автоклаве консервированных продуктов наиболее распространено погружение в воду с давлением воздуха сверху. При этом существует ограничение, заключающееся в том, что при температурах выше 100 °C необходимо исключить разрушение банок, содержащих пищевые продукты. Охлаждение перекачиваемых продуктов в непрерывном процессе может выполняться в самых разнообразных теплообменниках путем сверхбыстрого охлаждения или добавлением холодного ингредиента. В нижеприведенном примере фруктовое пюре должно быть охлаждено с помощью добавления льда. Количество льда необходимо определить по скорости потока и тепловым свойствам поступающей жидкости, а также по необходимой конечной температуре продукта.

### Пример 7.11. Охлаждение горячей жидкости льдом

Фруктовое пюре при 95 °C должно непрерывно охлаждаться до 5 °C путем добавления льда, имеющего начальную температуру -18 °C. Пюре с удельной теплоемкостью 3,3 кДж/(кг · °C) перекачивается в теплоизолированный реактор со смешиванием и непрерывным потоком с требуемым массовым расходом льда; удельная теплоемкость сока на выходе — 4,03 кДж/(кг · °C). Требуется определить массовый расход поступающего в реактор льда, если пюре закачивается в него со скоростью 0,5 кг/с.

М а с с о в ы й   б а л а н с :

$$\dot{m}_F + \dot{m}_I = \dot{m}_P.$$

Энергетический баланс (исходное состояние: 0 °C (жидкость))

$$q_F + q_I = q_P$$

$$q_F = \dot{m}_F c_{p,F} (T_F - T_{ref}) = \\ = 0,5 \text{ кг/с} \cdot [3,3 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C)}] (95 \text{ °C} - 0 \text{ °C}) = 156,74 \text{ кДж/с};$$

$$q_I = \dot{m}_I c_{p,I} (T_I - T_{ref}) + \dot{m}_I \Delta H_{fus} = \dot{m}_I [c_{p,I} (T_I - T_{ref})] + \Delta H_{fus} = \\ = \dot{m}_I \{ [2,02 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C)}] (-18 \text{ °C} - 0 \text{ °C}) - 333,22 \text{ кДж/кг} \} = \\ = \dot{m}_I (-369,58 \text{ кДж/кг});$$

$$q_P = \dot{m}_P c_{p,P} (T_P - T_{ref}) = \dot{m}_P \cdot 4,03 \text{ кДж/ч} \cdot (5 \text{ °C} - 0 \text{ °C}) = \dot{m}_P \cdot 20,15 \text{ кДж/кг}.$$

Решим относительно массового расхода льда, используя уравнения массового и энергетического балансов:

Массовый баланс:

$$\dot{m}_P = 0,5 \text{ кг/с} + \dot{m}_I.$$

Энергетический баланс:

$$156,75 \text{ кДж/с} + \dot{m}_I \cdot 369,58 \text{ кДж/кг} = \dot{m}_P \cdot 20,15 \text{ кДж/кг}.$$

Получим:

$$\dot{m}_P = 0,38 \text{ кг/с}.$$

## 7.5 Экономические аспекты материальных и экономических балансов и некоторые выводы

Материальный и энергетический балансы служат основой для оптимизации или модификации технологического оборудования пищевого производства. По материальным и энергетическим потокам определяются практически все затраты, виды и производительность оборудования, трудозатраты и требования к кадровому обеспечению, энерго- и водопотребление, а также объемы потоков отходов. Кроме того, потоком материалов и энергии на предприятии определяются наличие сырья и графики его поставок, дневные и недельные графики работы, графики отгрузки готовых изделий и складские запасы. Для обеспечения максимального превращения сырья при минимальном потреблении энергии и воды следует регулярно изучать материальные и энергетические балансы всего предприятия и отдельных технологических операций. Изменение состава сырья, стоимости удаления отходов или трудозатрат могут служить поводом для анализа текущей работы той или иной установки для обоснования необходимости монтажа нового оборудования, внедрения новых процедур сбора и удаления отходов или повышения производительности труда персона-

ла. Например, появление эффективного электронного оборудования для сортировки и дефектоскопии снизило потребность в ручной сортировке многих из фруктов и овощей. Экономическое обоснование приобретения такого оборудования может быть разработано на основе анализа материальных потоков и уровня устранения брака на одного работника.

В следующем примере решение приобрести нагреватель непрерывного действия основывается на сочетании расчетов материальных и энергетических балансов и экономического анализа.

### *Пример 7.12. Тепловая обработка крабов: приобретение нагревателя периодического или непрерывного действия*

#### *Необходимые сведения*

Крабы — ценный морепродукт. Часть добываемых крабов продается в живом виде, а оставшаяся подвергается тепловой обработке. При разделке крабов съедобная часть отделяется и продается предприятиям пищевой промышленности и в магазины. Технологический процесс обработки крабов очень трудоемкий — от добычи и сортировки живых крабов до разделки (извлечение мяса из туловища и клешней) подвергнувшегося тепловой обработке продукта. Крабов варят или обрабатывают насыщенным паром.

#### *Задача*

Недавно образованная компания *ABC Crab Co.* по переработке крабов стремится определить, следует ли для тепловой обработки крабов приобретать автоклав периодического действия или нагреватель непрерывного действия. В компании знают, что использование нагревателя непрерывного действия может дать экономию с одновременным повышением качества продукта, производительности и безопасности. Однако нагреватель непрерывного действия «под ключ» стоит около 100 000 долларов США, а автоклав — 15 000. С учетом соображений качества и цены продукта, а также желания резко выйти на рынок компания решила провести численное сравнение двух процессов. При этом следует рассмотреть следующие факторы: объемы выпуска продукции, эффективность использования энергии, качество продукта, требуемые трудозатраты, инвестиции и т. д. Один из важнейших факторов — это выход съедобного мяса крабов, который обычно составляет 10–12%. При этом даже небольшое увеличение выхода имеет существенное значение из-за высокой цены продукта.

**Примечание:** вышесказанное относится к синему (голубому) крабу, но для этого примера мы экстраполируем эти сведения на все виды крабов.

#### *Исходные данные — периодический («порционный») процесс*

Корзина (сетка) с 1000 кг крабов загружается в автоклав, который затем закрывают. В автоклав подается пар, а воздух при этом удаляется. Для поддержания потока из выпускных клапанов процесс идет при небольшом избыточном давлении. Когда температура автоклава достигает 100 °C, начинается цикл варки, продолжающийся 14 мин. Известно, что идеальная продолжительность процесса составляет 8 мин, но из-за неэффективности системы парораспределения для полной обработки крабов в центре автоклава требуется более продолжительный период. После завершения варки автоклав открывают, горячая сетка с крабами вынимается для охлаждения и загружается новая порция. Полное время цикла обычно составляет 20 мин при средней производительности 3000 кг/ч. Для работы с автоклавом требуются четыре оператора; расход пара составляет примерно 0,25 кг пара на 1 кг крабов.

#### *Исходные данные — непрерывный процесс*

Нагреватель непрерывного действия оснащен ленточным конвейером. Сырье помещают на один его конец и снимают с другого. Продукт перемещается по ленте с постоянной скоростью через варочную камеру с насыщенным паром. Проектная производительность установки — 5000 кг/ч, но она может работать и с производительностью 1000 кг/ч при небольшом уменьшении эффективности. Благодаря непрерывности процесса и высокому уровню контроля время варки составляет 10 мин. Для работы на установке требуются два оператора; расход пара составляет 0,20 кг пара на 1 кг краба.

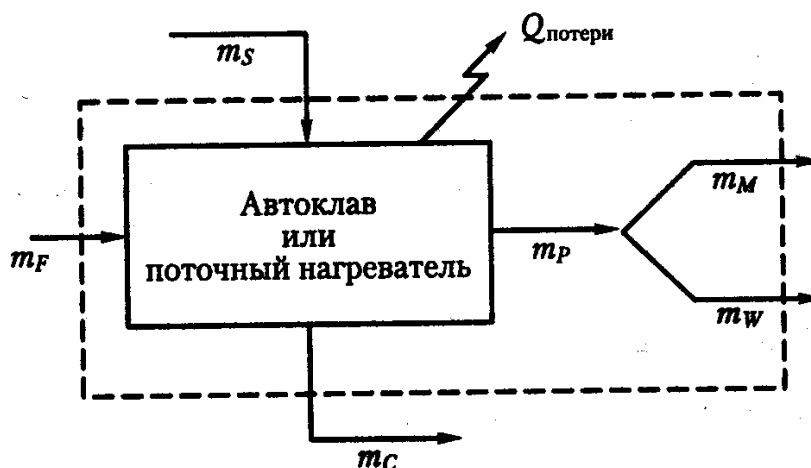
#### *Дополнительная информация*

Почасовая оплата оператора любого устройства тепловой обработки составляет \$6 в час, а работники, занятые разделкой крабов, получают \$3,63 за 1 кг полученного мяса. Живых крабов приобретают по \$0,77 за 1 кг.

**Решение**

Эта проблема типична для малых и средних предприятий. Приобретать ли оборудование, нанимать ли дополнительный персонал, внедрять ли новый процесс, планировать ли остановки для обслуживания — это проблемы, с которыми почти ежедневно сталкиваются руководители предприятий и инженеры-технологи. В данной задаче необходимо определить, имеет ли смысл тратить \$85 000 для покупки нагревателя непрерывного типа. При этом следует рассмотреть материальные факторы (трудозатраты, объем выпуска и выход), но сложнее измерить нематериальные факторы — возможность регулировать объемы выпуска, увеличивать ли объемы продукции выше требуемых в текущий момент, обрабатывать ли другие продукты. Задача решается в виде простого экономического баланса, проще всего составляемого с помощью электронных таблиц (например, *Microsoft Excel™*).

Блок-схема, представляющая оба процесса, может иметь следующий вид:



где  $m_F$  — масса сырья на входе;  $m_S$  — масса пара;  $m_C$  — масса конденсата;  $m_P$  — масса продукта;  $m_M$  — масса пригодного для продажи (съедобного) мяса крабов;  $m_W$  — масса отходов;  $Q_{\text{потери}}$  — потери энергии в окружающую среду.

При таком анализе необходимо определить каждую из этих величин и то, как они влияют на экономические показатели данной технологической операции. Кроме того, необходимо определить влияние этих переменных на другие экономически важные факторы, например, трудозатраты.

Расчеты по этой задаче производятся на 1 ч работы. Непрерывный процесс может дать более высокую производительность, чем автоклав, поэтому для простоты сравнения норма выработки устанавливается 3000 кг/ч. Показано, что оптимальное время варки в автоклаве составляет для крабов примерно 8 мин и что каждая минута варки сверх этого времени ведет к уменьшению выхода пригодного для продажи мяса на 0,6% [8]. Из-за своей малой эффективности для достаточной тепловой обработки автоклав требует 14 мин, а непрерывный процесс — 10 мин. Максимальный выход съедобного мяса составляет примерно 12%, но из-за потерь при обработке фактический выход ниже. Наконец, при непрерывном процессе требуется на два работника меньше, и в нем несколько более эффективно используется пар. На основе этой информации получаем данные и уравнения для последующей работы с электронными таблицами:

**М а с с о в ы й   б а л а н с :**

$$m_F + m_S = m_P - m_C$$

используя

$$m_P = m_M + m_W,$$

получим

$$m_F + m_S = m_M + m_W - m_C.$$

Таблица 7.2. Затраты на периодическую и непрерывную обработку крабов (из расчета на 1 ч)

Статья издержек <sup>а</sup> , \$	Установка периодического типа, \$	Установка непрерывного типа, \$
Сырые крабы, 0,77/кг	2310	2310
Мясо после разделки, 3,63/кг	915	1176
Оператор оборудования, 6/час	24	12
Затраты на пар <sup>б</sup>	—	—
Общие издержки в расчете на час работы	3249	3498
Стоимость продукта, 26,40/кг	6653	8554
Увеличение стоимости <sup>в</sup>	3404	5056
Различие в стоимости в час между непрерывным и периодическим способами	1652	

<sup>а</sup> Расчет проведен на 1 ч работы с использованием 3000 кг сырых крабов при выходе 252 кг для периодического и 324 кг — для непрерывного процесса.

<sup>б</sup> Затраты на пар в этом примере принимаем пренебрежимо малыми.

<sup>в</sup> Увеличение стоимости = стоимость продукта — общие издержки в расчете на 1 ч работы.

Энергетический баланс:

$$m_F c_{p,F} (T_F - T_{ref}) + m_S \Delta H_S = \\ = m_M c_{p,M} (T_M - T_{ref}) - m_W c_{p,W} (T_W - T_{ref}) + m_C \Delta H_C - Q_{потерь}.$$

В ы х о д :

$$\text{Выход съедобного мяса} = Y_F = (m_W - m_F). \quad (7.22)$$

Поскольку ни один из этих процессов еще реально не реализован, невозможно определить реальную массу получаемого в каждом процессе съедобного мяса  $m_M$ . Поэтому используя эмпирическую корреляцию, приведенную для выхода в работе [8], получим:

$$Y_F = Y_{\max} - 0,6(t_A - t_O), \quad (7.23)$$

где  $Y_F$  — конечный выход мяса, пригодного для продажи, %;  $Y_{\max}$  — максимальный выход мяса, пригодного для продажи, %;  $t_A$  — фактическое время обработки, мин;  $t_O$  — оптимальное время процесса, мин.

Используя это эмпирическое соотношение, можно теоретически сравнить выходы этих двух процессов. Следует отметить, что фактические выходы могут весьма отличаться от теоретических. Если  $Y_F$  получено с помощью уравнения (7.23), массу в кг получаемого пригодного для продажи мяса  $m_M$  можно определить с помощью уравнения (7.22). Пример связи между массовым и энергетическим балансами и экономическими расчетами приведен ниже.

Расчеты показывают, что периодический («порционный») процесс дает 252 кг мяса в час, а непрерывный — 324 кг/ч благодаря меньшей продолжительности обработки (уравнения (7.22) и

(7.23)). Кроме того, при непрерывном процессе используется на 150 кг/ч меньше пара, чем при «порционном». В данном примере для демонстрации связи между материальными балансами и экономическим эффектом используются затраты лишь на сырье и трудозатраты. Отличия затрат в производственных издержках между периодическим и непрерывным процессом в расчете на 1 ч приведены в табл. 7.2.

Этот краткий анализ свидетельствует в пользу покупки непрерывной системы, поскольку достигается значительное увеличение выхода и стоимости обработанного продукта. Капитальные затраты на непрерывную систему составляют на \$85 000 больше, чем на периодическую. На основе этого предварительного анализа количество рабочего времени, необходимого для возврата \$85 000, составляет:

$$\$85\,000 / \$1652 \text{ ч} = 52 \text{ ч.}$$

Этот период эксплуатации меньше, чем 2 недели работы в одну смену; он явно свидетельствует в пользу использования оборудования для непрерывной работы. Этот пример также иллюстрирует влияние выхода на эксплуатационные затраты для пищевых продуктов с высокой продажной стоимостью. Вообще покупка улучшенных технологических процессов для достижения более высоких выходов благоприятно сказывается на мясных продуктах всех видов и некоторых фруктовых и овощных продуктах.

Установки для производства пищевых продуктов, работающие круглогодично и производящие разнообразные продукты, создают дополнительные сложности в смысле оптимизации использования сырья, технологического оборудования, электро- и водоснабжения, а также минимизации затрат на транспортировку готовых упакованных пищевых продуктов. Минимальные затраты при этом должны определяться не только для каждого продукта в отдельности, но и относительно затрат на другие продукты. В этом случае минимальные затраты для любого отдельного продукта могут не соответствовать минимальным общим эксплуатационным затратам или наиболее выгодному режиму работы установки в целом. Следует также учитывать суточные изменения тарифов на электроэнергию, наценки за работу в ту или иную смену, затраты на смену продукции, графики мойки и очистки оборудования и наличие сезонного сырья. При составлении графика производства ряда продуктов на одной линии необходимо планировать остановки производства для очистки (мойки) технологической линии перед запуском другого продукта. Например, чтобы избежать необходимости промывать линию между партиями продуктов, ароматизированное молоко можно было бы обрабатывать после неароматизированного молока.

Помощь в оптимизации работы той или иной технологической установки может оказать компьютерное имитационное моделирование, основанное на материальном и энергетическом балансах для заданного набора продуктов, определенном наборе операций и комплексе графиков поставки. Существуют компьютерные программы [3], помогающие определить последовательность и продолжительность данной операции, а также наиболее удобное время суток для выпуска нескольких продуктов на одной или параллельных линиях. Эти программы учитывают описанные выше стоимостные факторы, основаны на требованиях к отгрузкам каждого продукта и определяют наиболее рентабельный с точки зрения затрат график технологического процесса.

Оптимизация любой установки и отдельных выполняемых на ней операций должна производиться (даже при эффективной работе на основе стандартов) разработчиками продуктов, службой научной организации труда и финансовой службой. Планирование ценообразования — это процесс, направленный на снижение общих затрат при производстве отдельного продукта путем замены ингредиентов, упаковки или модификации технологических процессов. Для операций переработки пищевых продуктов любая модификация рецептуры, требований к упаковке или условий технологического процесса почти наверняка повлияет на продукт в целом. Например, новый ингредиент может позволить увеличить скорость линии, что в свою очередь может повлиять на качество дозирования и фасовки. Любые изменения (независимо от их значительности или незначительности), должны быть проверены путем составления *реальных* материальных и энергетических балансов на действующей технологической линии. Это необходимо, чтобы удостовериться в том, что выходы продуктов равны или лучше, чем были раньше, что трудозатраты, затраты на удаление отходов, а также энерго- и водопотребление не увеличились, а восприятие потребителем качества продукта не изменилось.

Пищевые продукты зачастую определяются сложным комплексом потребительских качеств, основанных на вкусе/запахе, внешнем виде и структуре. Инженер-технолог должен понимать, насколько влияет снижение затрат, достигнутое с помощью планирования ценообразования, на изменения качества продукта. По материальному и энергетическому балансам трудно оценить изменения в качестве продукта, воспринимаемые потребителем. Любые изменения, внесенные в технологический процесс, должны быть оценены с помощью дополнительной проверки потребительского качества. Результатом тщательно выполненного материального и энергетического балансов в сочетании с планированием ценообразования не должно быть снижение затрат на производство продукта, который для рынка уже не привлекателен.

## Глоссарий

**Периодический** (*batch*): периодическому процессу подвергается порция материала, которая сначала загружается, обрабатывается, а затем выгружается. При обработке материал не поступает на обработку и не покидает процесс. Пример: сублимационная сушка — в камеру загружается замороженный материал, там он сушится, а затем выгружается из камеры.

**Граница** (*boundary*): пунктирная линия, определяющая окружение и систему на блок-схеме.



**Непрерывный** (*continuous*): во время непрерывного процесса вход и выход системы действуют постоянно. Пример: непрерывное получение асептически обработанных соков, при котором жидкость проходит через цикл нагрев–выдержка–охлаждение и непрерывно упаковывается.

**Блок-схема** (*flowchart*): структурная схема, описывающая рассматриваемый процесс.

**Массовая доля**  $x_i^j$  (*mass fraction*): масса некоторого вещества в объекте, деленная на массу этого объекта. «*i*» относится к конкретному потоку, несущему данное вещество, а «*j*» означает это вещество.

**Открытая система** (*open system*): система открыта, если масса пересекает границу системы. По определению, полунепрерывный и непрерывный процессы рассматриваются как открытые системы.

**Полунепрерывный** (*semibatch*): полунепрерывный процесс характеризуется продолжающейся подачей и выводом дискретных упаковок продукта. Пример: туннельная сушка. Тележки с продуктом на лотках вводят с одной стороны туннеля и извлекают с другой, поэтому процесс называют полунепрерывным. Обратите внимание, что воздух и тележки при этом могут двигаться в одном или в противоположных направлениях.

**Стационарный (установившийся) поток** (*steady state flow*): используется для описания связи между разными переменными процесса, такими, как температура, скорость потока или давление и время. Если эти параметры независимы от времени, процесс называют стационарным.

**Система**: технологический процесс, определяемый некоторой границей. Система может быть различна по размеру — от одной клетки до комплекса производственного оборудования. Система может состоять из всей технологической линии, одной отдельной операции в этой линии, или из части отдельной операции.

**Нестационарный поток** (*неустановившийся, нестационарный, переходный поток*): термин используется для описания связи между разными переменными процесса, такими, как температура, скорость потока или давление и время. Если эти переменные изменяются со временем, процесс называют нестационарным.

## Литература

1. Felder, R. M. and Rousseau, R. W. Stoichiometry // Elementary Principles of Chemical Processes. — 2<sup>nd</sup> ed. — NY: Wiley, 1986.
2. Avlani, P. K., Singh, R. P. and Chancellor, W. J. Energy Consumption in sugar beet production and processing in California // Energy and Agriculture, CNV 271 / Dept. of Agricultural Engineering. — Davis: University of California, 1976.
3. Balint, A. and Okos, M. R. Simulation of multi-product food processing operations using batches // Food Processing Automation, ASAE Publication 02-90. — St. Joseph, MI: Amer. Soc. of Agricultural Engineering, 1990.

4. Bomben J. L. Dietrich W. C., Hudson, J. S., Hamilton, H. K. and Farkas D. F. Yields and solids loss in steam blanching, cooling and freezing vegetables // J. Food Sci. — 1975. — № 40. — P. 660–664.
5. Boulton R. B., Singleton, V. L., Bisson, L. F. and Kunkee R. E. Principles and Practices of Winemaking. — NY: Chapman and Hall, 1996.
6. Casimir D. J. Counter Current Extraction // CSIRO Food Res. Q. — 1983. — № 43. — P. 38–43.
7. Chipoletti J. C., Robertson, G/ H., and Farkas D. F. Freezing of vegetables by direct contact with aqueous solutions of ethanol and sodium chloride // J. Food Sci. — № 42. — P. 911–916.
8. Crapo, C. A. and Crawford D. L. Influence of polyphosphate soak and cooking procedures on yield and quality of Dungeness crab meat // J. Food Sci. — № 56(3). — P. 657–659, 664.
9. Farkas D. Use of seed sizes for controlling snap bean quality for processing // Food Tech. — № 21(5). — P. 789–791.
10. Felder, R. M. and Rousseau R. W. Elementary principles of chemical processes. — 2<sup>nd</sup> ed. — NY: Wiley & Sons, 1986.
11. Graham, R. P. Huxsoll C. C., Hart, M. R., Weaver, M. L., and Morgan A. I., Jr. «Dry» caustic peeling of potatoes // Food Tech. — № 23(2). — P. 195–197, 199, 221.
12. Gunasekaran, S., Fisher, R. J., and Casimir D. J. Predicting soluble solids extraction from fruits in a reversing, single screw counter current diffusion extractor // J. Food Sci. — № 54(5). — P. 1261–1265.
13. Holland, C. D. and Liapis, A. I. Computer Methods for Solving Dynamic Separation Problems. — NY: McGraw Hill, 1983.
14. Johnson, J. M., Lopez, A., Wood, C. B. and Moser R. E. Relationships of apple grade and size to apple value in processing of apple slices // Food Tech. — 1959. — № 13(7). — P. 385–390.
15. The Almanac of the Canning, Freezing, Preserving Industries. — 75<sup>th</sup> ed. — Westminster, MD: Edward E. Jones & Sons, 1990.
16. Rice: Chemistry and Technology. — 2<sup>nd</sup> ed. / Juliano B. O. (ed.). — St. Paul, MN: American Association of Cereal Chemists, 1985.
17. King, C. J. Separation Processes. — 2<sup>nd</sup> ed. — NY: McGraw Hill, 1980.
18. Lewicki, P. and Lenart A. Energy consumption during osmo-convection drying of fruits and vegetables // Drying of Solids / Mujumdar, A. S. (ed.). — NY: International Science, 1992.
19. Lopez A. The Canning Trade. — 12<sup>th</sup> ed. — Vol. 3. — Baltimore, MD, 1987.
20. Handbook of Cereal Sciences and Technology / Lorenz K. J. and Kulp, K (eds). — NY: Marcel Dekker, 1991.
21. Matz, S. A. The chemistry and technology of cereals as food and feed. — 2<sup>nd</sup> ed. — NY: Van Nostrand Reinhold, 1991.
22. Mohsenin, N. Electromagnetic Radiation Properties of Foods and Agricultural Products. — NY: Gordon and Breach, 1984.
23. Thermal Processes for Low-Acid Foods in Metal Containers / National Food Processors Association. — 13 ed. — Bulletin 26-L. — 1995.
24. Thermal Processes for Low-Acid Foods in Glass Containers / National Food Processors Association. — 13 ed. — Bulletin 30-L. — 1991.
25. Chemical Engineer' Handbook / Perry, R. H. and Chilton C. H. (eds). — 6<sup>th</sup> ed. — NY: McGraw Hill, 1984.
26. Peters M. S. and Timmerhaus, K. D. Plant Design and Economics for Chemical Engineers. — 3<sup>rd</sup> ed. — NY: McGraw Hill, 1980.
27. Energy in food processing / Singh R. P. (ed.). — NY: Elsevier, 1986.
28. Singh R. P. Computer Applications in Food Technology. — San Diego: Academic Press, 1996.

29. Singh R. P. and Heldman, D. R. Introduction to Food Engineering. — 2<sup>nd</sup> ed. — San Diego: Academic Press, 1993.
30. Toledo, R. T. Fundamentals of Food Process Engineering. — 2<sup>nd</sup> ed. — NY: Van Nostrand Reinhold, 1991.
31. Urbaniec, K. Modern Energy Economy in Beet Sugar Factories. — NY: Elsevier, 1989.
32. Watt, B. K. and Merrill, A. L. Composition of Foods, Raw, Processed, Prepared // Agricultural Handbook № 8. — Washington, DC: US Dept. of Agriculture, 1963.

## Дополнительная литература

*Stoichiometry*: Felder, R.M. and Rousseau, R.W., 1986. 1986, Elementary Principles of Chemical Processes: 2<sup>nd</sup> ed. — NY: Wiley, 1986.

# 8 МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ УПАКОВКИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

*Рубен Х. Эрнандес*

*Перевод Н. Савченкова под ред. канд. техн. наук доц. С. А. Вологжаниной*

## Содержание

### 8.1 Введение

#### 8.1.1 Основные экономические показатели пластиковых упаковок

- 8.1.1.1 *Затраты на разработку*
- 8.1.1.2 *Единовременные затраты*
- 8.1.1.3 *Затраты на упаковочный материал*
- 8.1.1.4 *Затраты на упаковочное машинное оборудование, отличные от единовременных затрат*
- 8.1.1.5 *Затраты на обработку упаковок*
- 8.1.1.6 *Издержки обращения*

#### 8.1.2 Анализ затрат на жесткую пластиковую тару

- 8.1.2.1 *Опрессовка под давлением (ОД)*
- 8.1.2.2 *Выдувное формование*
- 8.1.2.3 *Термоформование*
- 8.1.2.4 *Эластичный упаковочный материал*

### 8.2 Пластмассы в процессе упаковки пищевых продуктов

#### 8.2.1 Свойства пластмасс

#### 8.2.2 Свойства листов и пленок, используемых при изготовлении эластичной упаковки

#### 8.2.3 Пластмассы и контроль за пищевыми продуктами и лекарственными препаратами

### 8.3 Основные виды пластмасс

#### 8.3.1 Полиолефины

- 8.3.1.1 *Полиэтилены*
- 8.3.1.2 *Полипропилен*
- 8.3.1.3 *Металлоцены*

#### 8.3.2 Поливинилхлорид

- 8.3.2.1 *Общая информация*
- 8.3.2.2 *Свойства*
- 8.3.2.3 *Варианты применения*

- 8.3.2.4 *Сложности, связанные с использованием ПВХ, и требования FDA*
- 8.3.2.5 *Поставщики ПВХ (эластичного, незаполненного)*
- 8.3.3 Сополимеры винилхлорида с винилиденхлоридом
  - 8.3.3.1 *Общая информация*
  - 8.3.3.2 *Разновидности сополимеров SaranT*
  - 8.3.3.3 *Варианты применения*
- 8.3.4 Полистирол
  - 8.3.4.1 *Универсальный полистирол (УПС)*
  - 8.3.4.2 *Ударопрочный полистирол*
  - 8.3.4.3 *Растягивающиеся пленки из полистирола*
  - 8.3.4.4 *Поставщики гомополимера ПС*
- 8.3.5 Поливиниловый спирт
  - 8.3.5.1 *Общая информация*
  - 8.3.5.2 *Свойства*
  - 8.3.5.3 *Варианты применения*
  - 8.3.5.4 *Поставщики*
- 8.3.6 Нейлон
  - 8.3.6.1 *Общая информация*
  - 8.3.6.2 *Свойства*
  - 8.3.6.3 *Варианты применения*
  - 8.3.6.4 *Поставщики Нейлона 6*
- 8.3.7 Полиэтилентерефталат (ПЭТФ)
  - 8.3.7.1 *Общая информация*
  - 8.3.7.2 *Свойства*
  - 8.3.7.3 *Варианты применения*
  - 8.3.7.4 *Термопластичные сополиэферы*
  - 8.3.7.5 *Нафталат полиэтилена*
  - 8.3.7.6 *Поставщики*
- 8.3.8 Поликарбонаты
  - 8.3.8.1 *Поставщики*
- 8.3.9 Пленки с силиконовым и алюминиевым покрытием
- 8.4 Добавки к пластмассам
  - 8.4.1 Противовуалирующие добавки
  - 8.4.2 Антиадгезивные добавки
  - 8.4.3 Бактерицидные и фунгицидные добавки
  - 8.4.4 Антиоксиданты
  - 8.4.5 Антистатики
  - 8.4.6 Красители
    - 8.4.6.1 *Окрашивающие вещества*
    - 8.4.6.2 *Органические пигменты*
    - 8.4.6.3 *Неорганические пигменты*
    - 8.4.6.4 *Красочные лаки (крапак)*
    - 8.4.6.5 *Красители с перламутровым оттенком*
    - 8.4.6.6 *Красители и FDA*
  - 8.4.7 Термостабилизаторы
  - 8.4.8 Пластификаторы
  - 8.4.9 Стабилизаторы ультрафиолетового излучения
  - 8.4.10 Другие добавки
- 8.5 Массообмен в упаковочных системах
  - 8.5.1 Массообмен сквозь микроотверстия
    - 8.5.1.1 *Диффузия сквозь микроскопическое отверстие в защитной мембране*
    - 8.5.1.2 *Диффузия Кнудсена*
    - 8.5.1.3 *Поток в промежуточной поре*
    - 8.5.1.4 *Прохождение потока сквозь большие отверстия*
    - 8.5.1.5 *Гидродинамический поток газа (поток Пуазейля)*
  - 8.5.2 Проницаемость

- 8.5.2.1 *Защитный материал*
- 8.5.2.2 *Механизм проницаемости*
- 8.5.2.3 *Проницаемость водяного пара и газов*
- 8.5.2.4 *Переменные, воздействующие на проницаемость*
- 8.5.2.5 *Определение проницаемости*
- 8.5.2.6 *Многослойные структуры*
- 8.5.2.7 *Применение проницаемости в оценке сечения материала и срока хранения*

Литература

## 8.1 Введение

Доля полимеров на рынке упаковочных материалов растет с поразительной быстротой, приводя к частичной замене бумаги, стекла и металлов. Имея уникальную комбинацию свойств, пластик способствовал развитию упаковочной промышленности. Пластиковая тара отличается легкостью, устойчивостью к повреждению, прозрачностью, эластичностью, сжимаемостью и пластичностью. Кроме того, она поддается формованию в различные формы, на такие упаковки легко наносится краска и печать, они подлежат стерилизации и могут быть использованы многократно. Из множества разнообразных свойств пластика можно выделить ряд преимуществ — простоту в обработке, хорошие механические свойства, широкий диапазон температур обработки, самую низкую плотность среди всех упаковочных материалов. Кроме того, такие материалы являются проницаемыми, что может иметь как положительные, так и отрицательные стороны. Следует отметить также конкурентоспособность пластика относительно бумаги, стекла, стали и алюминия.

### 8.1.1 Основные экономические показатели пластиковых упаковок

Цены на упаковочную тару зависят от типа используемого материала и той формы, которую предполагается придать упаковке. Процессы комплексного преобразования (например, выдувное формование, нанесение покрытий и ламинирование) увеличивают затраты на готовую упаковку. На стоимость упаковочной продукции оказывают воздействие цены на сырье, конкуренция в области технологий, вертикальная интеграция, а также возможности замены материала. На цены влияют внутренние экономические условия: спады, перепроизводство, а этапы экономического роста становятся причиной увеличения производственных мощностей. Международный спрос на товары и упаковочные материалы также является одним из факторов, воздействующих на цены. Возможно использование упаковок собственного производства, их покупка напрямую у производителей или же у независимых распространителей. Несмотря на то что тара может быть приобретена по любому из перечисленных каналов, получение всех упаковочных компонентов из одного источника возможно лишь в исключительных случаях. Как правило, изготовление таких компонентов, как бутылки, крышки, пленки, этикетки, поддоны и оберточный материал осуществляется различными производителями.

### 8.1.1.1 Затраты на разработку

В соответствии с исследованием, проведенным Леонардом в 1980 г. [31], стоимость упаковки классифицируется следующим образом:

1. Определение характеристик упаковки: учитывает основные свойства продукта, требования Управления по контролю за продуктами и лекарственными препаратами (FDA, США), а также потребности заказчика.
2. Поиск решения: определяет типы упаковочных материалов, которые в равной степени могут служить достижению одной и той же цели. В этом случае необходимо рассмотрение по меньшей мере двух различных упаковок.
3. Дизайн: обеспечивает оптимальную комбинацию материалов, формы, размера, внешнего вида, цвета, специальных свойств, а также срока хранения продукта.
4. Подготовка моделей упаковки: обеспечивает основу для оценки и исследования ее заказчиком.
5. Подготовка образцов упаковки: дает возможность тестирования упаковки в реальных ситуациях.
6. Оценка поведения упаковки в условиях экстремальных процессов: например, при небрежном обращении или высокой температуре может потребоваться разработка программы оценки образцов.
7. Подготовка анализа затрат и спецификаций: учитывает результаты программы по отбору образцов.
8. Проведение пробного маркетинга: осуществляет оценку общего плана развития производства упаковочного материала для удовлетворения потребностей служб материально-технического обеспечения и потребителя.
9. Усовершенствование дизайна и спецификаций: может потребоваться для улучшения первоначальной концепции.
10. Инструментальная оснастка производства: может включать в себя формы (шаблоны), литографические пластины для крышек и тару, но не ограничивается названными компонентами.
11. Программа контроля качества продукции: необходима для регулировки требований, предъявляемых к качеству, характеристикам и допустимым пределам.
12. Затраты на запуск оборудования: связаны с началом производства.

### 8.1.1.2 Единовременные затраты

Единовременные затраты представляют собой расходы, возникающие только единожды в процессе ожидаемого времени изготовления упаковки.

1. Машины, используемые при изготовлении упаковки, которые могут включать в себя, например, машину для изготовления пакетов или выдувной формовки.
2. Поставляемые шаблоны или клише для упаковок, крышек, второстепенных упаковок.
3. Печатные формы, клише или цилиндры.
4. Оборудование упаковочной линии или запасные части.
5. Монтаж оборудования.

### 8.1.1.3 Затраты на упаковочный материал

1. Полимеры или пленки, необходимые для изготовления тары.

Затраты на полимеры в большинстве случаев представляют собой основной ценовой компонент при изготовлении тары, и цены на нее могут быть использованы для приблизительной оценки цены упаковки. Численные множители, устанавливающие отношение между ценой на полимер и ценой тары, могут помочь инженеру пищевой промышленности приблизительно оценить затраты на изготовление упаковки.

2. Упаковки для партий товара, поставляемых из-за границы.
3. Плата за перевозку груза из-за границы.
4. Хранение упаковочного материала, его погрузка и разгрузка на пути от поставщика к производственным линиям заполнения.
5. Показатель брака, причиной которого являются повреждения и потери в процессе изготовления упаковок, их заполнения, или нанесения на них печати.
6. Отбор образцов и контроль.

### 8.1.1.4 Затраты на упаковочное машинное оборудование, отличные от единовременных затрат

1. Арендная плата за оборудование и машины.
2. Обслуживание и техническое обслуживание.
3. Амортизация закупленных машин, вспомогательное оборудование.
4. Потребляемая энергия и сооружения.

### 8.1.1.5 Затраты на обработку упаковок

1. Основная рабочая сила.
2. Вспомогательная рабочая сила.
3. Накладные расходы.
4. Вспомогательные материалы.

### 8.1.1.6 Издержки обращения

1. Хранение, погрузка, разгрузка и складирование.
2. Плата за перевозку груза из-за границы.

## 8.1.2 Анализ затрат на жесткую пластиковую тару

Полимеры, разрешенные к применению в пищевой промышленности, дороже тех полимеров (пластмасс), которые могут быть отнесены к универсальному разряду, поскольку они требуют повышенных гигиенических требований при обработке; вводимые добавки должны быть одобрены Управлением по контролю за продуктами и лекарственными препаратами (FDA); ограничено использование в качестве добавок вторично перерабатываемых материалов. Например, в случае использования поли-



винилхлорида (ПВХ) добавление веществ, повышающих теплостойкость, красителя и пластификатора почти удваивают стоимость получаемого материала.

Плотность пластмассы напрямую влияет на стоимость пластиковой тары. Для заданной упаковки стоимость материала, используемого при изготовлении тары  $C_m$ , составляет:

$$C_m = A \cdot l \cdot d \cdot r = W \cdot r,$$

где  $A$  — площадь упаковки;  $l$  — средняя толщина;  $d$  — плотность пластмассы;  $r$  — стоимость единицы массы.

Если тара может быть изготовлена из двух различных полимеров по цене  $r_1$  и  $r_2$ , толщина тары поддерживается постоянной, то стоимость упаковки 1 связана со стоимостью упаковки 2 значениями плотности:

$$C_{m_1} = X \cdot C_{m_2},$$

где  $X = d_1 r_1 / d_2 r_2$  и  $d_1$  и  $d_2$  — плотность пластмасс (полимеров). Пример: если  $d_2 = 0,953 \text{ г/см}^3$ ,  $r_2 = \$0,385$ ,  $d = 1,257$  и  $r_1 = \$0,63$ , то  $X = 2,175$ , а это означает, что тара, изготовленная из пластмассы 1, будет стоить в 2,157 раза дороже, чем тара, изготовленная из пластмассы 2.

#### 8.1.2.1 Опрессовка под давлением (ОД)

Опрессовка под давлением используется при изготовлении тары и ее компонентов (например, крышек), размеры которых требуют высокой точности. Основное правило для массового производства и простой геометрии изготавливаемого продукта состоит в следующем: стоимость упаковки или ее компонента в два раза больше, чем стоимость пластмассы — стоимость пластмассы составляет 50% от стоимости тары [31]. Например, себестоимость 1000 полипропиленовых крышек стоимостью \$0,46 и весом 10 г каждая будет составлять приблизительно

$$C = 2 \times 1000 \times 10 \times 0,46 / 454 = \$20,2 / 100 \text{ штук.}$$

Основными ценовыми компонентами деталей, изготовленных опрессовкой под давлением, являются следующие:

- полимеры для получения пластиков;
- шаблоны и полости; затраты на шаблон постепенно погашаются в процессе изготовления миллиона деталей;
- процесс опрессовки под давлением (стоимость рабочей силы, энергия и накладные расходы);
- утильсырье, отбракованное или измельченное для повторного использования;
- сборка, отделка и/или украшение.

Поэтому чем проще опрессованный компонент, тем ниже его цена.

Например, простые опрессованные под давлением крышки, то есть крышки, надеваемые на горловину с зацеплением за венчик, изготавливаются на шаблонах, состоящих из двух частей.

Для изготовления резьбовой навинчивающейся крышки без прокладки, используемой на бутылках, необходим более сложный процесс опрессовки. В этом случае резьба предотвращает снятие крышки с шаблона за счет обычного толчка, как это делается с надеваемыми на горловину крышками. Трафарет, необходимый для изготовления такой крышки, стоит в два раза больше, чем трафарет для крышки, надеваемой на горловину с зацеплением за венчик. Фактическое влияние типа изготавливаемой крышки на ее стоимость оценить довольно сложно, поскольку существует большое количество переменных составляющих (количество рамок, полостей, технологическая оснастка, время производственного цикла), которые влияют на дизайн и работу шаблона. Стоимость резьбовой навинчивающейся крышки без прокладки может быть примерно в 3,4 раза выше, чем стоимость пластмассы. В случае укомплектования крышки прокладкой, изготовленной из фибролита и пластиковой пленки, ее стоимость по сравнению с крышкой без прокладки может возрасти на 25–30%.

Дозирующие колпачки для бутылок с моющими средствами и колпачки аэрозолей изготавливаются из нескольких частей. Этот процесс требует сочетания мультиопрессовки и сборки, что существенно увеличивает затраты на такие компоненты. К некоторым факторам, увеличивающим уровень затрат, могут быть отнесены следующие:

1. Сложность деформируемого изделия.
2. Изделия, состоящие из нескольких частей и требующие дополнительной ручной сборки.
3. Хранение запасов материала для формования (затраты на формование, которое производится под заказ, ниже, чем затраты на формование избыточного количества изделий, так как в последнем случае необходимо иметь склад).
4. Партии из нескольких миллионов компонентов более рентабельны, чем небольшие партии из нескольких десятков тысяч компонентов.
5. Право собственности на шаблон.

### 8.1.2.2 Выдувное формование

Наиболее широко используемыми полимерами для тары, изготовленной методом выдувного формования, являются полиэтилен высокой плотности (ПЭВП, *HDPE*), термопластичные полиэферы, полистирол и полипропилен, составляющие 90% рынка полимеров. Жесткая тара, изготовленная методом выдувного формования, в первую очередь бутылки, широко используется для упаковки напитков, пищевых продуктов и медицинских препаратов, чистящих средств и многих других продуктов.

При сравнении со стеклянной тарой следует заметить, что соотношение издержек производства полиолефиновых пластмасс и стекла составляет 1,4 к 1, но более низкая масса пластиковой тары снижает затраты на перевозку и может почти уравнять стоимость сырья, необходимого для изготовления тары из полиолефиновых полимеров и из стекла. Как правило, стоимость отправки бутылок, изготовленных методом выдувного формования из ПЭВП, в больших коробках в 3,2 раза выше стоимости пластмассы на фабрике формовщика. Упаковки размером менее 12 унций (360 мл) имеют несколько более высокий коэффициент, чем упаковки емкостью в 1 галлон (3,75 л). Цена цветных упаковок выше и зависит от состава краски и количества изготовленных изделий.

К основным производителям тары, изготовленной методом выдувного формования, в Северной Америке относятся следующие: *Constar International Inc.* (г. Атланта, штат Джорджия), *Johnson Controls, Inc., Plastic Containers Division* (г. Манчестер, штат Мичиган), *Owens-Brockway Plastic Products* (г. Толедо, штат Огайо), *Graham Packaging Co.*, (г. Йорк, штат Пенсильвания), *Plastipak Packaging, Inc.*, (г. Плимут, штат Мичиган), *Continental PET Technologies, Inc.* (г. Флоренс, штат Кентукки), *Continental Plastic Containers Inc.*, (г. Норфолк, штат Коннектикут), *Silgan Plastic Corp.* (г. Честерфилд, штат Монтана), *Wheaton Plastic Products* (г. Милвилл, штат Нью-Джерси), *Southeastern Container Inc.* (г. Энка, штат Северная Каролина).

### 8.1.2.3 Термоформование

Термоформованные упаковки изготавливаются из листов термопластического материала. При их изготовлении широкое распространение получили такие полимеры, как полиэтилен, ПВХ (поливинилхлорид, *PVC*), ПЭТФ (*PET*), полистирол и ацетат целлюлозы. Листы для изготовления тары получают за счет использования экструзии или каландрирования.

Существует большое количество методов термоформования, и к наиболее распространенным относятся прессование, пневматическое и вакуумное формование, прессование на плитах, профильное прессование, экструзия, штамповка жестким пуансоном и матрицей, штамповка эластичным пуансоном, литьевое формование и др. Затраты на термоформованную упаковку включают:

- стоимость полимера;
- затраты на изготовление листов или их закупку;
- оборудование, предназначенное для термоформования, формовочный и отделочный инструмент (шаблоны для термоформования дешевле, чем шаблоны для опрессовки под давлением и выдувного формования);
- работы по термоформованию, включающие нагрев листа, формование тары и ее отделку;
- в случае изготовления многослойной упаковки термосваривание слоев полимера с бумагой толщиной, как правило, до 0,015 дюймов (380 мкм);
- прочие затраты, связанные с обработкой отходов, например, доизмельчение и реэкструзия (многослойные структуры удаляются или включаются в качестве измельченного слоя; безотходное термоформование в значительной степени снижает уровень затрат);
- затраты, следующие за процессом формования и включающие расходы на укладку, упаковку и отгрузку.

### 8.1.2.4 Эластичный упаковочный материал

Эластичная, гибкая или нежесткая тара изготавливается из пластиковой пленки и многослойных комбинаций, сочетающих в себе пластик, бумагу, фольгу и оксидно-алюминиевую, силикатную или металлизированную пленку. Полученный упаковочный материал может быть прозрачным, непрозрачным, металлизированным или цветным. Эти материалы формируются в пакеты, сумки, прокладки или обертки (упаковки). За

счет объединения соответствующих материалов в эластичное соединение возможно выполнение практически любой задачи. Эластичная упаковка может быть использована для многих продуктов, кроме того, имеется большое количество способов заполнения упаковки, а также извлечения из нее соответствующего продукта. В специальных атмосферных условиях или условиях вакуума возможна упаковка твердых и жидких продуктов, порошков, химикатов, лекарств и пищевых продуктов. Эластичная упаковка поддается заморозке, варке, обработке паром, нагреву и облучению. Использование новых полиолефиновых пластомеров (ПОП) дает возможность добиться больших значений проницаемости для  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$ , что упрощает упаковку свеженарезанных продуктов [53]. С другой стороны, для продуктов, чувствительных к воздействию кислорода, изготавливаются комбинированные материалы с очень высоким уровнем противодействия проникновению кислорода. Существует возможность изготовления эластичных упаковок с высококачественными поверхностями, на которые наносится глубокая, офсетная, высокая печать или флексография.

Поскольку существует ряд полимерных материалов, которые могут быть скомбинированы с фольгой или бумагой, и различные способы обработки поверхности, количество эластичных конструкций достаточно велико.

Общие капиталовложения, необходимые для осуществления соединения материалов, включая печать, очень высоки. С точки зрения использования эластичной комбинации затраты на материал связаны с ее составом, который, в свою очередь, определяется характеристиками продукта, условиями хранения и перевозки, а также требованиями, предъявляемыми к сроку его хранения. Стоимость материалов, используемых для изготовления эластичных упаковок, выражается, как правило, в единицах площади комбинации (структуры), то есть в  $\text{м}^2$ .

Одной из наиболее дешевых эластичных упаковок является полиэтиленовый пакет без нанесенной на него печати. Затраты на пакет, изготовленный из простого полимера, выражаются следующим образом:

$$C_m = A \cdot l \cdot d \cdot r / 454 ,$$

где  $A$  — площадь;  $l$  — толщина;  $d$  — плотность;  $r$  — цена фунта полимера.

Например, затраты на выдерживающий значительную нагрузку пакет без печати размером  $50 \times 30$  см, изготовленный из ПЭВП (плотность  $0,95 \text{ г/см}^3$ ), общей площадью в  $3000 \text{ см}^2$  и толщиной  $125 \text{ мкм}$  будут выражаться как

$$C_m = 3000 \cdot 125 \cdot 10^{-4} \cdot 0,95 \cdot 0,47 / 454 = \$0,00369 .$$

Стоимость увеличивается примерно на 60% при выдувании пленки и на 50% — при преобразовании пленки в пакет. Таким образом, окончательная стоимость каждого пакета составляет \$0,014.

В ходе операции преобразования затраты на многослойную конструкцию складываются из стоимости объединенных в ней компонентов. Рассмотрим процесс изготовления многослойного материала, предназначенного для упаковки кофе. Возможная конструкция может быть составлена из 100% лавсана с нанесенным на обратную сторону оттиском толщиной  $0,6 \text{ мил}$  ( $1 \text{ мил} = 0,025 \text{ мм}$ ), склеенного с алюминиевой

Таблица 8.1. Анализ затрат при изготовлении многослойной упаковки для кофе, обладающей высокими барьерными свойствами

Облицованный пленкой пакет для кофе	Затраты (\$/м <sup>2</sup> )	
Краска 1,5 г/м <sup>2</sup> (30% СВ) <sup>a</sup>	\$0,00661/г	0,130
Акриловый клей, 5 г/м <sup>2</sup> (50% СВ)	\$0,00551/г	0,030
Лавсановая пленка 0,6 мил, 20 г/м <sup>2</sup>	\$0,00441/г	0,040
Алюминиевая пленка толщиной 0,3 мил, 21 г/м <sup>2</sup>	\$0,00496/г	0,100
Покрывание, наносимое методом экструзии 16 г/м <sup>2</sup> из:	\$0,00138/г	0,020
50% ПЭНП	\$0,00088/г	
50% металлоцены	\$0,00187/г	
Промежуточные расходы на материал		0,330
Брак 10%		0,030
<b>Общие затраты на материал</b>		<b>0,360</b>
Часовая скорость печати <sup>б</sup>	96 000 м <sup>2</sup> /ч	0,022
Часовая скорость расслоения (ламинирования)	96 000 м <sup>2</sup> /ч	0,066
<b>Общая стоимость обработки</b>		<b>0,088</b>
Затраты на эластичный материал		0,448
Валовая прибыль 18%		0,081
<b>Общие затраты на эластичный материал</b>		<b>0,529</b>

Примечание: ПЭНП — полиэтилен низкой плотности; <sup>a</sup> — 100%-белая; <sup>б</sup> — офсетная печать на 8-красочной машине.

фольгой (0,0003 дюйма), и соэкструдирована со смесью 50% полиэтилена низкой плотности (ПЭНП, LDPE) и 50% металлоцена. В табл. 8.1 представлены основные ценовые компоненты такой комбинации.

Основными производителями пленки и полимерных листов в Северной Америке являются следующие компании: *DuPont Co.* (г. Вашингтон, штат Делавэр), *Mobile Chemical Co.* (г. Питтсфорд, штат Нью-Йорк), *Bemis Co.* (г. Миннеаполис, штат Миннесота), *First Brand Co.* (г. Данбури, штат Коннектикут), *Cryovac Division* (г. Дункан, штат Южная Каролина), *American National Can Co.* (г. Чикаго, штат Иллинойс), *Print-pack Inc.* (г. Атланта, штат Джорджия), *Huntsman Packaging Co.* (г. Солт Лейк Сити, штат Юта), *ICI Americas Inc.* (г. Вилмингтон, штат Делавэр), *James River Co. Packaging Business* (г. Милфорд, штат Огайо).

## 8.2. Пластмассы в процессе упаковки пищевых продуктов

Синтетические или природные полимеры представляют собой макромолекулы, состоящие из повторяющихся одного или нескольких типов групп атомов (называемых мономерами) и соединенных друг с другом ковалентным типом связи. Наименьшая химическая единица, которая полностью характеризует основную структуру

полимера, называется структурной единицей. Например, структурной единицей для полиэтилена будет являться  $\text{CH}_2$ -группа. Специфические свойства полимеров определяются большим количеством структурных единиц в молекуле. Эффект наличия большого количества мономеров состоит в том, что при добавлении или удалении нескольких сот структурных единиц свойства полимера значительно не изменяются. Термопластичные полимеры называются пластиками. Ниже мы дадим краткий обзор основных свойств, характеризующих пластики, используемые в настоящее время при разработке, оценке, спецификации и изготовлении пластиковой тары, предусмотренной для хранения пищевых продуктов.

## 8.2.1 Свойства пластмасс

**Состав.** Конечный состав пластмассы включает в себя макромолекулы, состоящие из определенного мономера (или мономеров), а также добавок, которые вводятся в процессе обработки. Например, основой ПП является пропилен, а ПВХ получается в результате полимеризации винилхлоридового мономера. ПП содержит антиокислители, а к ПВХ в качестве вспомогательных средств, способствующих процессу обработки, добавляется пластификатор.

**Молекулярный вес.** В отличие от соединений с низким молекулярным весом, состоящих из молекул одного типа, полимер состоит из макромолекул различной длины. По этой причине молекулярный вес полимера фактически представляет собой распределение молекулярных весов. Распределение молекулярного веса полимера определяется средним молекулярным весом и его разбросом. Обычно используются два средних молекулярных веса, а именно средний по количеству молекулярный вес  $\bar{M}_n$ , и средний по весу молекулярный вес  $\bar{M}_w$ . Ширина распределения молекулярного веса ( $MWD$ ) задается отношением  $\bar{M}_w / \bar{M}_n$ , называемым показателем дисперсности ( $DI$ ). Для большинства промышленных полимеров показатель  $DI$  находится между 2 и 8. Низкий  $DI$  свидетельствует об узком распределении данного полимера, а высокий  $DI$  — о широком распределении [40]. Параметры  $\bar{M}_n$ ,  $\bar{M}_w$  и  $MWD$  определяют такие свойства полимера, как прочность, температуру плавления и температуру термосваривания. Распространенным методом, используемым для определения  $\bar{M}_n$ ,  $\bar{M}_w$  и  $MWD$  является гель-хроматография, которая описана в материалах *ASTM D 3593*.

**Температура плавления  $T_m$ .** Температура плавления означает максимальную температуру, до которой может быть нагрета пластмасса, прежде чем она расплавится. Температура плавления большинства кристаллических и некристаллических полимеров отображается в величине температурного диапазона, зависящего от показателя  $MWD$  и состава. Полибутилен отличается низкой температурой плавления, равной 275 К, а температура плавления ПЭТ высока и равна 728 К [52]. Полукристаллические пластмассы становятся мягкими еще до момента достижения своей температуры плавления.

Особое внимание следует обратить на то, что аморфные пластмассы (например, полистирол) не имеют диапазона температуры плавления, а становятся мягкими в момент повышения температуры (особенно в случае превышения температуры стеклования). Методы измерения температуры плавления описываются в *ASTM D 2117* и *ASTM D 3418*.

**Температура стеклования  $T_g$ .** Температура стеклования связана с моментом начала вращения и подвижностью сегментов цепочки, включающей небольшое количество мономеров. Понятие стеклования важно, поскольку при температуре ниже  $T_g$  полимер становится жестким и стеклообразным, а при температуре выше  $T_g$  он характеризуется пластичным резиноподобным поведением [40]. При упаковке пищевых продуктов  $T_m$  и  $T_g$  определяют температурный диапазон возможности применения тары. Например, упаковка из ПП при заморозке может стать ломкой, если ее  $T_g$  близка к 0 °С, а полистирол становится ломким при комнатной температуре, поскольку его  $T_g$  составляет 80 °С и в нем не содержится пластификатора. С другой стороны, полимер с низким значением  $T_m$  (например, полиэтилен) не может быть стерилизован при помощи пара. Для определения  $T_m$  и  $T_g$  используются методы дифференциального термического анализа (DTA) и дифференциального сканирующего калориметрирования (DSC). Эти методы описаны в ASTM B 3418.

**Показатель текучести расплава MFI.** Этот показатель дает представление об экструзивных характеристиках полимера и используется в первую очередь при контроле качества продукции. В соответствии с ASTM D 1238, показатель MFI выражается в граммах экструдата за 10 мин.

**Механические свойства.** Эти свойства пластмасс обозначают замеры прочности, растяжения, жесткости, предел прочности на разрыв, предел прочности при растяжении, модуль растяжения (сила/площадь), описанные в ASTM D 638. Ниже приводится перечень некоторых других свойств и методов, которые могут представлять интерес. Номер соответствующего метода по стандарту ASTM приводится в скобках.

- методы кондиционирования пластмасс (D 618);
- коэффициент линейного теплового расширения (D 696);
- отклонения температуры тепла, используемого при термоформовании (D 648);
- теплопроводность (C 177);
- воспламеняемость (D 1433).

## 8.2.2 Свойства листов и пленок, используемых при изготовлении эластичной упаковки

**Толщина.** Единицей измерения в системе SI является микрометр (мкм,  $10^{-6}$  м). В США используется мил (0,001 дюйма), толщина листового материала равна 0,01 мил.

**Характеристики прочности.** Характеристики эластичности гибкой конструкции при растяжении–сжатии включают предел прочности на разрыв, используемый для определения максимального напряжения, которое способен выдержать материал при растяжении; модуль упругости, используемый для определения усилия, необходимого для деформации конструкции. Модуль упругости или модуль Юнга представляет собой жесткость материала Н/м<sup>2</sup> (ASTM D 882). Представление о прочности материала дает площадь под диаграммой напряжение–деформация<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> В России характеристики прочности на растяжение определяют по ГОСТу 11262, модуль упругости — по ГОСТу 9550. Прим. науч. ред.

**Плотность.** Плотность пластмассы пропорциональна ее кристалличности. В стандарте *ASTM D 1505* (в России — в ГОСТе 11234) дается описание метода «коэффициента уплотнения», который используется для оценки плотности пленок и полимеров (пластмасс). Плотность измеряется в  $\text{кг/м}^3$ .

**Сопротивление прорыву (продавливанию)** — это гидростатический напор, необходимый для прорыва материала, при подаче увеличивающегося давления на круглый участок площади, диаметр которого равен 30,48 мм (1,2 дюйма). Точечное сопротивление прорыву представляет собой давление в фунтах на квадратный дюйм. Это тот же самый тест, который используется для определения сопротивления прорыву бумаги и бумажных изделий. Метод свободно падающей стрелы описан в *ASTM D 3420* и *ASTM D 1709*.

**Ударная вязкость (прочность на удар).** Ударная вязкость представляет собой энергию, необходимую для прокола эластичной конструкции при ударном нагружении. Это дает возможность определения степени прочности. Описание теста приводится в *ASTM D 3420* и *ASTM D 1709* (в России — в ГОСТе 4647–69 или ГОСТе 14235–69).

**Прочность при разрыве.** При измерении прочности при разрыве принимается во внимание сила, поглощаемая образцом пленки при распространении разрыва. Для определения данной характеристики используют два стандартных метода. В стандарте *ASTM D 1004* приводится описание первоначального сопротивления разрыву, тогда как стандарт *ASTM D 1922* касается энергии, поглощаемой образцом при распространении разрыва, начало которому было положено за счет небольшого отверстия, сделанного в образце. Значение сопротивления надрыву может быть подвержено значительным колебаниям в зависимости от степени ориентации (например, в ориентированной полипропиленовой пленке). Соответствующее описание приводится в *ASTM D 1938*.

**Сопротивление образованию отверстий при многократном складывании.** Данное свойство представляет собой способность пленки противостоять образованию отверстий при многократном складывании. На пленке с низким значением подобной сопротивляемости по линии ее изгиба при условии многократного складывания будут образовываться отверстия (*ASTM A 456*). Аналогичным тестом является тест на сопротивляемость изгибу.

**Сопротивление излому.** Этот тест характеризует способность материала противостоять изгибу или складыванию. Рекомендуемая процедура *ASTM* описывается в стандарте *D 2176* (в России — в ГОСТе 4648), используемом для определения количества складываний, необходимых для разрыва образца пленки.

**Температура термосваривания (термосклеивания).** Важными свойствами для упаковки, изготовления пакетов или запечатывания гибкого материала является способность материала к термосвариванию. Для оценки герметизации, как правило, замеряются два значения: прочность верхнего слоя (*ASTM F 88*) и прочность прихваточного шва. Как уже отмечалось выше, необходимо принимать во внимание абсолютную температуру и диапазон температур. Средний молекулярный вес полимера



ние — например, при прохождении пленки по свободноповорачивающимся роликам, при формировании пакетов, оборачивании пленкой продукта, а также при укладывании пакетов в стопы. На коэффициент трения оказывают воздействие такие факторы, как скорость, температура, статическое напряжение, влажность, склеивание и гладкость поверхности (*TAPPI T 503* и *ASTM D 1894*, в России — ГОСТ 11269).

**Адгезивность** — это способность двух пленок склеиваться при взаимном соприкосновении. Этот эффект усиливается гладкостью поверхности, а также воздействием давления на пленку — например, когда листы пленки укладываются в стопы или в случае с плотно упакованными рулонами пленки. Адгезивность может быть определена замером усилия, необходимого для разделения двух листов пленки в том случае, если прикладываемое усилие перпендикулярно листам (*ASTM D 1893* и *D 3354*, или же в результате процедур, предлагаемых Институтом упаковки *T3629*).

**Потускнение.** Потускнение возникает, если луч света, проникая через образец, отклоняется более чем на  $2,5^\circ$ . Появление потускнения, как правило, вызвано рассеиванием света, причиной которого являются дефекты поверхности и неоднородность материалов (*ASTM D 1003*).

**Глянец.** Глянец представляет собой процент падающего света, отражаемого под углом, равным углу падения (как правило,  $45^\circ$ ). Этот показатель позволяет измерить способность поверхности к отражению. Высокая гляцевитость способствует четкому изображению при любом освещении и создает привлекательный блеск (*ASTM D 2457*).

**Прозрачность и непрозрачность.** Коэффициент светопрозрачности прозрачного материала составляет более 90%. Коэффициент светопрозрачности представляет собой процент падающего света, проходящего сквозь образец. Определяется этот показатель эффективностью поглощения и рассеивания света материалом. Для большинства полимеров поглощение света незначительно, поэтому прозрачность определяется по показателю рассеивания. Мощность рассеивания света полимером является результатом морфологической неоднородности и/или наличия кристалла и наполнителей. Чем менее кристаллизован полимер, тем он более прозрачен. Аморфный, однородный полимер, например, «кристаллический» полистирол, обладающий незначительной рассеивающей способностью или не обладающий ею вовсе, является прозрачным. В значительной степени кристаллизованный полимер, например ПЭВП, как правило, будет непрозрачным. Светопрозрачность измеряется в соответствии с *ASTM D 1003*.

**Формоустойчивость (стабильность размеров).** Формоустойчивость является индикатором способности конструкции сохранять свои размеры в условиях изменения температуры и влажности. Продольное и поперечное деформирование могут вызвать различные изменения формоустойчивости. Стабильность размеров имеет значение в любом процессе преобразования эластичного материала и особенно это касается печати, поскольку даже незначительные изменения размеров могут стать причиной возникновения проблем при печати (*ASTM D 1204*, ГОСТ 10226).

**Проницаемость.** Барьерные свойства пластиков обычно выражают значением коэффициента его проницаемости  $P$ . При увеличении проницаемости барьерные свойства снижаются, но коэффициент проницаемости фактически зависит от совме-

стного воздействия диффузионного процесса и процесса растворимости. Широко известное соотношение  $P = DS$ , где  $D$  — коэффициент диффузии, а  $S$  — растворимость по закону Генри, справедливо лишь при малых концентрациях проникающего вещества. На значения  $D$ ,  $S$  и  $P$  воздействуют несколько факторов: 1) химический состав полимера и проникающего вещества; 2) кристалличность полимера (диффузия и сорбция происходят в основном за счет аморфной фазы полимера); 3) температура (с увеличением температуры увеличивается и проницаемость); 4) наличие в полимере пластификаторов и наполнителей. В пищевых системах рассматриваются значения проницаемости воды, газов, а также вкусовых компонентов и ароматизаторов. Стандартный метод измерения газопроницаемости для пленки и листового пластика описан в *ASTM 1434*. Определение проницаемости пленок кислородом с использованием кулонометрического датчика описывается в *ASTM D 3985*, а для упаковок — в *ASTM F 1307*. Метод определения проницаемости водяного пара для эластичных материалов описывается в *ASTM 372*, для пленок/листов с использованием инфракрасного датчика — в *ASTM F 1249*, а для упаковок — в *ASTM D 895*, *D 1251* и *D 3079*. Интенсивность проницаемости водяного пара (WVTR) для самоклеющихся пленок описывается в *ASTM D 3833*. Проницаемость органических соединений, вкусовых компонентов и ароматизаторов была описана в [19].

**Стойкость к химическому воздействию.** Оценка стойкости пластмасс к воздействию химикатов должна соответствовать: для кислот — *ASTM D 543*, для щелочей — *ASTM D 543*, смазок и масел — *ASTM D 722*; растворителей — *ASTM D 543* и солнечного света — *ASTM D 1435*<sup>1</sup>.

**Смачиваемость.** Адгезия пластиковых поверхностей и печать на них зависят от значения поверхностного натяжения. Единицей измерения поверхностного натяжения является смачиваемость (*ASTM D 2578*, ГОСТ 4650).

## 8.2.3 Пластмассы и контроль за пищевыми продуктами и лекарственными препаратами

Производители упаковок для пищевых продуктов озабочены содержанием в упаковочных материалах компонентов, которые могут контактировать с продуктами в результате процесса миграции. Если такие компоненты обнаруживают в пищевых продуктах, их называют косвенными добавками. Использование всех пластмассовых упаковок, находящихся в косвенном контакте с пищевыми продуктами, в США должно быть санкционировано *FDA (Food and Drug Administration)*.

Раздел 21 Свода федеральных постановлений США включает в себя как все косвенные, так и прямые добавки. В разделе 174 рассматриваются общие аспекты, касающиеся косвенных добавок в пищевых продуктах в процессе их производства. Раздел 175 включает в себя обширный перечень разрешенных косвенных добавок в клеющих веществах и компонентах покрытий. Раздел 176 относится к бумажным и картонным компонентам, раздел 177 касается полимеров, а раздел 178 — вспомогательных веществ, производственных добавок и дезинфицирующих средств. Поскольку все компоненты упаковочных материалов должны соответствовать требо-

<sup>1</sup> В России стойкость полимеров к агрессивным средам регламентирует ГОСТ 12020.

ваниям, изложенным в Своде федеральных постановлений, то производитель упаковки обязан поставить об этом в известность упаковщика пищевых продуктов. Например, термоиндуктивная пленка, являющаяся герметизирующей прокладкой для твердой тары, представляет собой покрытие, содержащее в качестве основных компонентов алюминиевую фольгу, полипропиленовую пленку, картон и клеящее вещество. Рекомендации *FDA* относительно всех этих компонентов (со ссылкой на Раздел 21 Свода федеральных постановлений) содержатся в следующих разделах: 175.105 для клеящих веществ, 175.300 — для загустевающих и полимерных покрытий, 175.320 — для покрытий из полиолефиновых пленок, 176.170 — для бумажных и картонных компонентов, соприкасающихся с водянистыми и жирными пищевыми продуктами, 176.180 — для бумажных и картонных компонентов, соприкасающихся с сухими пищевыми продуктами, 176.300 — для фунгицидов, 177.1210 — для крышек с уплотнительными прокладками, 177.1520 — для полиолефинов. Использование алюминиевой фольги регулируется в разделе 409 приложения о пищевых добавках к Закону о контроле за пищевыми продуктами, лекарственными и косметическими препаратами.

## 8.3 Основные виды пластмасс

### 8.3.1 Полиолефины

Олефин («маслообразующий») — это устаревший синоним понятия алкены. Первоначально термином «олефин» обозначали этилен. Алкены представляют собой углеводороды, содержащие двойную углерод-углеродную связь, то есть гомологи этилена и пропилена. В промышленности пластмасс «олефин» — широко распространенный термин, который относится к группе пластмасс, имеющих в качестве элементарной структурной единицы этилен и пропилен. Термин «полиолефин» должен применяться только к полимерам, изготовленным из алкенов, будь то гомо- или сополимер. В него включают группы полиэтиленов и полипропиленов.

Полиэтилен, первый полезный олефиновый полимер, использовавшийся в процессе упаковки пищевых продуктов, был впервые применен в 1940-х гг. На первых порах полиэтилен низкой плотности получали за счет полимеризации свободных радикалов в условиях высокой температуры и давления, но структуры этого полимера были достаточно нерегулярны. Использование улучшенных полиолефинов, цепочек линейных полимеров (например, ПЭВП) в 1960-х гг. стало возможным с развитием процесса полимеризации при низком давлении с использованием катализаторов *Ziegler-Natta*. Полимеры, полученные таким образом, состоят из коротких, средних и длинных молекул и имеют широкий диапазон разветвлений. Эти пластмассы характеризуются широким *MWD* и широким спектром состава. Улучшения линейности цепочки удалось добиться в 1970-х гг. К тому времени появились технологии растворов и газовой фазы, использовавшиеся для изготовления линейных полимеров низкой плотности. В настоящее время за счет процесса, основанного на использовании металлоценовых катализаторов, осуществляется изготовление новых, сложных полиолефинов, известных как металлоценовые поли-

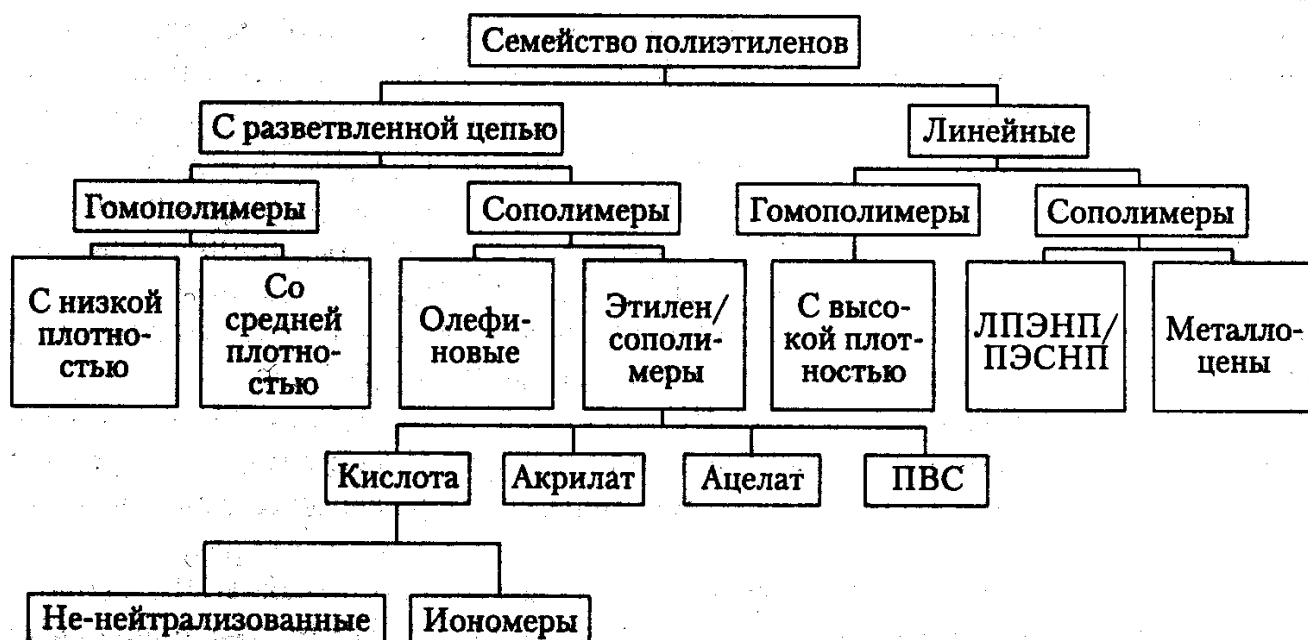


Рис. 8.1. Семейство полиэтилена. ПВС (EVOH) — поливиниловый спирт, ЛПЭНП (LLDPE) — линейный полиэтилен низкой плотности, ПЭСНП (ULDPE) — полиэтилен сверхнизкой плотности

меры<sup>1</sup>. Такие полимеры в отличие от изготавливавшихся ранее имеют гораздо более узкий спектр *MWD* и состава.

Полиэтилены с разветвленной структурой описываются в разделе 8.3.1.1, а металлоцены — в разделе 8.3.1.3.

### 8.3.1.1 Полиэтилены

**Общая информация.** Полиэтилены (ПЭ) представляют собой группу присадочных полимеров, основанных на этилене ( $\text{CH}_2=\text{CH}_2$ ). Полиэтилен может быть как линейным, так и обладать разветвленной структурой, быть сополимером или гомополимером. Другим сомономером может быть алкен, например пропен, бутен, гексен, октен, или же соединение, имеющее полярную функциональную группу, — например, винилацетат (ВА), акриловая кислота (АК), этилакрилат (ЭА), метилакрилат (МА) или виниловый спирт (ВС).

Если молярная концентрация или сомономер составляют менее 10%, то полимер может быть квалифицирован либо как сополимер, либо как гомополимер. На рис. 8.1 изображено семейство ПЭ. Полиэтиленовые пластмассы используются в качестве пленок, запрессованных пластмассовых упаковок, крышек, а также многослойных пленок. Такие пластмассы имеют широкий диапазон состава и *MWD*, что определяет многообразие значений прочности, ударной вязкости, термических и барьерных свойств, а также характеристик, имеющих отношение к процессу термосваривания материала и условиям его обработки.

**Линейный полиэтилен и полиэтилен с разветвленной структурой.** Линейный полиэтилен включает в себя длинные цепочки этиленового мономера, связанные без

<sup>1</sup> Металлоцен — катализатор, способствующий получению заданных свойств полимера. Его начали использовать сравнительно недавно (в 1990-х гг.). Полученный материал стали называть металлоценовым полимером.

основного разветвления. Результатом стереорегулярности линейной молекулы, как правило, становится полимер высокой кристалличности, и кристалличность линейного ПЭ составляет от 70 до 90%. С другой стороны, главная роль разветвлений в базовой (основной) цепи состоит в ограничении образования кристаллов ПЭ и создании аморфного или «слабо уплотненного» ПЭ. Поскольку кристаллические участки плотнее аморфных, линейный ПЭ плотнее ПЭ с разветвленной структурой. ЛПЭНП сочетает в себе свойства как ПЭВП, так и ПЭНП.

Кристалличность ПЭ с разветвленной структурой, как правило, составляет от 40 до 60%, а его плотность колеблется в пределах от 0,910 до 0,970 г/см<sup>3</sup>.

Количество и длина разветвлений в ПЭ могут контролироваться за счет добавления сомономеров — например, пропилена или гексена. В зависимости от условий реакции, а также типа и количества сомомера серийно выпускается множество различных разветвленных ПЭ.

Линейный ПЭ может изготавливаться в качестве гомополимера ПЭВП, сополимерного линейного полиэтилена низкой плотности (ПЭНП) и полиэтилена сверхнизкой плотности (ПЭСНП). Сополимеры изготавливаются с бутеном, гексеном или октеном. Результатом контролируемого размещения сомономера в цепочке полимера в процессе полимеризации становится до некоторой степени линейный полимер с очень короткими ответвлениями и низкой плотностью. ЛПЭНП характеризуется относительно ограниченным молекулярным весом и *MWD*, а также линейной структурой с очень короткими ответвлениями, что объясняется наличием бутена, гексена или октена.

FDA разрешило использование полиолефиновых пластмасс и их непосредственный контакт с пищевыми продуктами, что разъясняется в 21 CFR, раздел 177.1520.

#### 8.3.1.1.1 Полиэтилен низкой плотности

**Свойства.** ПЭНП представляет собой гомополимер с разветвленной структурой. Результатом разветвления цепочек становится полимер с низким процентом кристалличности, обеспечивающей прозрачность, эластичность, способность к герметизации и простоту обработки. Фактические значения перечисленных свойств зависят от баланса молекулярного веса, *MWD* и разветвленности.

**Варианты применения.** В том, что касается режима обработки, ПЭНП чрезвычайно универсален. При его обработке могут быть использованы различные методы, принятые при работе с термопластичными материалами. Сюда относятся, например, получение пленки методом экструзии с раздувом, отлив пленки из раствора, наносимое методом экструзии покрытие, экструзия или выдувание в формы.

По сравнению с другими видами пластиков ПЭНП обладает высокими барьерными свойствами относительно проникновения воды и одновременно он наиболее проницаем для кислорода, CO<sub>2</sub>, паров органических веществ и запахов.

Чаще всего из ПЭНП изготавливают пленку. В США 55% от общего объема производства ПЭНП перерабатывается в пленку, толщина которой составляет менее 300 мкм. Кроме того, из ПЭНП изготавливают контейнеры и пакеты, предназначенные для хранения пищевых продуктов; обшивку, футеровку, пленку для использования в сельском хозяйстве; продукты, используемые в домашнем хозяйстве; оберточную пленку и т. д. Некоторые свойства ПЭНП представлены в табл. 8.2.

Таблица 8.2. Свойства пленок и пластмасс, изготовленных из ПЭНП с разветвленной структурой

Температура плавления, °С	105–115
Морозостойкость, °С	–70
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	0,918–0,935
Предел прочности при растяжении, мПа	10–16
Модуль упругости, мПа	90–130
Проницаемость:	
для Н <sub>2</sub> О при 37,8 °С	66–99 <sup>a</sup>
для О <sub>2</sub> при 25 °С	1940 <sup>b</sup>
для СО <sub>2</sub> при 25 °С	10490 <sup>b</sup>
для N <sub>2</sub> при 25 °С	700 <sup>b</sup>
Сопротивление воздействию:	
кислот	хорошее
щелочей	хорошее
масла и смазок	плохое
воды	хорошее

Примечание: ПЭНП — полиэтилен низкой плотности; <sup>a</sup> — в (г · мкм)/(м<sup>2</sup> · сут · кПа); <sup>b</sup> — в [л (STP) · мкмоль]/(м<sup>2</sup> · сут · кПа); STP — стандартные температура и давление (0 °С, 1 атм).

По [35a].

Кристалличность полиэтилена средней плотности (ПЭСП) составляет от 0,925 до 0,950, и поэтому он несколько прочнее, жестче и менее проницаем, чем ПЭНП. Обработка ПЭСП осуществляется в условиях, схожих с условиями обработки ПЭНП, но, как правило, при более высокой температуре.

Основным конкурентом ПЭНП является ЛПЭНП, который при схожей плотности обеспечивает превосходную устойчивость. Однако в вариантах использования, требующих высокую степень прозрачности материала, или при нанесении покрытия на основу, предпочтение по-прежнему отдается ПЭНП. Тенденции изменения свойств полиэтилена представлены в табл. 8.3.

**Полимеры ПЭ с разветвленной структурой.** Другие ПЭ с разветвленной структурой изготавливаются за счет сополимеризации этилена либо с алкенами, либо с мономерами, содержащими полярные функциональные группы, например, ВА, АК и ВС. Результатом включения полярных мономеров в основную цепочку становится создание этиленовых сополимеров с более низкой кристалличностью, повышенной эластичностью, более широким диапазоном температур термосклеивания и более плотными веществами. Некоторые из этих сополимеров (например, ЭВА) имеют барьерные свойства, в значительной степени отличающиеся от свойств первоначального гомополимера.

Содержание ВА в сополимере колеблется от 5 до 50%; такие сополимеры выпускаются серийно, хотя для оптимального использования в пищевой промышленности рекомендуется применять первичные сополимеры с содержанием ВА от 5 до 20%.

Севиленовые (СЭВА) пластмассы отличаются в первую очередь своей эластичностью, прочностью и способностью к термосклеиванию в покрытиях, наносимых

Таблица 8.3. Изменение свойств полиэтилена

<i>При увеличении среднего молекулярного веса</i>	
Предел прочности на разрыв	Увеличивается
Ударная вязкость	Увеличивается
Прозрачность	Увеличивается
Предельное удлинение	Увеличивается
Прочность при плавлении	Увеличивается
Сопротивление надрыву	Уменьшается
Температура плавления	Увеличивается
<i>При расширении распределения молекулярного веса</i>	
Предельное удлинение	Уменьшается
Сопротивление надрыву	Уменьшается
Ударная вязкость	Уменьшается
Давление плавления	Уменьшается
Сопротивление плавлению	Увеличивается
Диапазон термосклеивания	Увеличивается
<i>При увеличении плотности</i>	
Предел прочности на разрыв	Увеличивается
Температура плавления	Возрастает
Прозрачность	Уменьшается
Предельное удлинение	Уменьшается
Сопротивление надрыву	Уменьшается
Ударная вязкость	Уменьшается
Защита	Уменьшается
Газопроницаемость	Уменьшается

методом экструзии. Физические свойства имеющегося ПЭНП в значительной степени изменяются в зависимости от выбора условий реакций, а также от типа и количества сомомера.

#### 8.3.1.1.2 Севилен (СЭВА)

**Свойства.** ЭВА представляет собой статистический сополимер, чьи свойства зависят от содержания ВА (винилацетата,  $\text{CH}_2 = \text{CHOCCH}_3$ ) и молекулярного веса. При увеличении содержания ВА кристалличность снижается, однако в отличие от ПЭНП, одновременно повышается плотность. Увеличение содержания ВА также ведет к повышению прозрачности, эластичности при низких температурах, увеличению ударной вязкости и прочности материала. Когда содержание ВА достигает 50%, севилен становится полностью аморфным (прозрачным). Поскольку ацетатная группа полярна, то при увеличении содержания ВА одновременно увеличивается и полярность пластмассы. При увеличении полярности наблюдается повышение адгезионной прочности и склеиваемости. При увеличении молекулярного веса увеличиваются также вязкость (клейкость), плотность, прочность термосклеивания, липкость при высокой температуре и эластичность.

**Варианты применения.** Ввиду превосходной адгезии и простоты обработки, ЭВА выпускается в виде пленки, используемой в качестве прокладки при термосклеивании в процессе соэкструзии, и хорошо смешивается с гомополимером ПЭ. ЭВА используется в качестве прокладки при термосклеивании в виде покрытия, нанесенного методом экструзии на ПЭТ, целлофан и двухосно ориентированные упаковочные полипропиленовые пленки. Эти материалы применяют для упаковки сыра и в качестве пленок, используемых для медицинских целей. Выбор севиленна оправдан, если необходима плотность при низких температурах (например, при изготовлении пузырей для льда, а также оберточных пленок для мяса и домашней птицы) [30]. FDA разрешило использование сополимеров ЭВА для их непосредственного контакта с пищевыми продуктами, что отражено в 21 CFR, раздел 177.1350.

#### 8.3.1.1.3 Этиленoакриловая кислота

В результате сополимеризации этилена с акриловой кислотой (АК,  $\text{CH}_2=\text{CHCOOH}$ ) создаются сополимеры, содержащие карбоксильные группы по всей длине основной и боковой цепи молекулы. Такие сополимеры известны как ЭАК.

**Свойства.** При увеличении содержания АК снижается кристалличность, что ведет к повышению прозрачности. Одновременно с увеличением полярности повышается адгезионная прочность, а температура термосклеивания снижается из-за снижения кристалличности. Соплимеры ЭАК представляют собой эластичные термопластики, обладающие химической стойкостью и барьерными свойствами, схожими со свойствами ПЭНП. Соплимеры ЭАК превосходят ПЭНП по прочности, ударной вязкости, прилипаемости при высокой температуре, адгезионной прочности. Эти полимеры в основном используются в качестве blisterных упаковок и в виде прокладки между алюминиевой пленкой и другими полимерами, изготовленной методом экструзии.

**Варианты применения.** Пленки из ЭАК используются в эластичных упаковках для мяса, сыра, закусок, медикаментов, а также при изготовлении упаковок из вакуумформованной пленки на подложке и при адгезивном ламинировании. Покрытия, изготовленные методом экструзии, наносят на упаковки для приправ и пищевых продуктов, мелованную бумагу, асептические коробки, составные (сборные) банки и тубики для зубной пасты. FDA разрешило использование сополимеров ЭАК для их непосредственного контакта с пищевыми продуктами, что отражено в пункте 21 CFR, раздел 177.1320. К таким материалам относятся сополимеры из этилена, содержащие до 25% АК [34].

**Поставщики ПЭ с разветвленной структурой** — *American Polymers* (г. Ворчестер, штат Массачусетс), *Bamberger Polymers Inc.* (г. Лэйк Саксесс, штат Нью Йорк), *Chevron Chemical Co.* (г. Хьюстон, штат Техас), *Down Plastics* (г. Мидлэнд, штат Мичиган), *DuPont Co* (г. Вилмингтон, штат Делавер), *Eastman Chemical Co.* (г. Кингспорт, штат Теннесси), *Exxon Chemicals Americas* (г. Хьюстон, штат Техас), *Mobil Polymers* (г. Норвуд, штат Коннектикут), *Monmouth Plastics Inc.* (г. Асбури Парк, штат Нью-Джерси), *Novacor Chemicals Ltd.* (г. Калгари, Канада), *Quantum Chemical Corp.* (г. Цинцинати, штат Огайо), *Rexene* (г. Даллас, штат Техас), *Union Carbide Corp.* (г. Данбэри, штат Коннектикут), *Washington Penn Plastic Corporation* (г. Вашингтон, штат Пенсильвания), *Westlake Plastics PVC Corporation* (г. Хьюстон, штат Техас).



#### 8.3.1.1.4 Иономеры (сополимеры $\alpha$ -олефинов)

В результате нейтрализации ЭАК или ЭМАК (этиленметилакрилата) при помощи катиона (например,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  или  $\text{Li}^+$ ) получается вещество, обладающее по сравнению с сополимером, не подвергнутым нейтрализации, лучшими светопропускаемостью (прозрачностью) и ударной вязкостью, а также большей прочностью при плавлении. Эти вещества называются иономерами, поскольку они сочетают в цепи полимера ионную и ковалентную связи. Торговым названием иономеров, принятым компанией *DuPont*, является Сурлин (*Surlin*<sup>®</sup>).

**Свойства.** В процессе упаковки иономеры используются в тех случаях, когда значение имеют такие факторы, как формуемость, ударная вязкость и внешний вид. Они используются в сочетании с нейлоном, ПЭТ, ПЭНП, ПВДХ, картоном и алюминиевой фольгой для формирования термической прокладки в пленках и многослойных конструкциях. Иономеры улучшают сопротивление конструкции растрескиванию при многократном складывании и ее сопротивление излому. Наиболее распространенными методами при обработке иономеров являются совместное экструзивное ламинирование и нанесение покрытия методом экструзии. Иономеры, полученные при нормальных температурах обработки в диапазоне от 175 до 290 °С, могут противостоять воздействию при температурах до -90 °С (ниже, чем для ПЭНП) [42]. Защитные характеристики иономеров невелики, но их сочетание с ПВДХ позволяет создать превосходный комбинированный материал с высокими барьерными свойствами. Существует более 50 промышленных разрядов иономеров, обладающих широким диапазоном свойств. Иономеры натриевого типа обладают оптимальными оптическими свойствами, прилипаемостью при высокой температуре и маслостойкостью. Иономеры цинка более инертны по отношению к воде, обладают лучшей клейкостью при соэкструзии и экструзии при покрытии фольги [47].

**Варианты применения.** Иономеры используются в многослойных пленках, применяемых при упаковке свежего и обработанного мяса, например, хот-догов. Кроме того, из иономеров изготавливают упаковку для замороженных пищевых продуктов (рыбы и птицы), сыра, закусок, фруктовых соков, вина, воды, растительного масла, маргарина, орехов и фармацевтических продуктов. Иономеры обладают высокой маслостойкостью и стойкостью к воздействию агрессивных сред, а также обеспечивают надежную герметизацию при различных температурах.

Управление по контролю за пищевыми продуктами и лекарственными препаратами США (*FDA*) разрешило использование иономеров для их непосредственного контакта с пищевыми продуктами (21 *CFR*, раздел 177.1330).

**Производители иономеров — *DuPont* и *Exxon*.**

#### 8.3.1.1.5 Полиэтилен сверхнизкой плотности

ПЭСНП представляет собой сополимер этилена и октена плотностью от 0,880 до 0,915 г/см<sup>3</sup>. Сополимеры ПЭСНП обладают хорошим сочетанием прочности, способности к герметизации, эластичности, а также оптических свойств. Они превосходят ЛПЭНП по устойчивости к надрыву и проколу, ударной вязкости и светопропускаемости (прозрачности). Проницаемость для кислорода у них выше, чем у других видов полиэтилена, но схожа с проницаемостью, свойственной ЭВА. Значения *WVTR* (проницаемости для водяных паров) для ПЭСНП схожи со значениями для полиэтилена.

Таблица 8.4. Свойства пленки и полимеров ЛПЭНП

Температура плавления, °С	122–124
Удельная масса	0,910–0,940
Прочность при разрыве, МПа	13–27,6
Модуль упругости, кПа	262–518
Модуль изгиба при 23 °С, МПа	276–725

#### 8.3.1.1.6 Линейный полиэтилен низкой плотности

**Свойства.** Физические свойства ЛПЭНП определяются его молекулярной массой и плотностью (от 0,916 до 0,940). Имея линейное строение молекул, ЛПЭНП обладает большей кристалличностью, а значит и большей жесткостью по сравнению с ПЭНП. ЛПЭНП обладает большими значениями предела прочности на разрыв, сопротивления проколу, надрыву, прочности при растяжении и имеет температуру плавления на 10–15 °С выше, чем ПЭНП, однако последний по сравнению с ЛПЭНП имеет лучшую прозрачность. По причине более высокой кристалличности глянецовитость и дымчатость ЛПЭНП уступает глянецовитости и дымчатости ПЭНП.

**Варианты применения.** ЛПЭНП широко используется в процессе изготовления липкой/растягивающейся пленки, мешков для бакалейных товаров и транспортных мешков, предназначенных для перевозки тяжелых грузов. Краткий обзор свойств ЛПЭНП приводится в табл. 8.4.

#### 8.3.1.1.7 Полиэтилен высокой плотности

**Свойства.** ПЭВП представляет собой молочно-белый неполярный линейный термопласт. Гомополимеры ПЭВП имеют длинные и прямые молекулярные цепи с небольшими разветвлениями. При охлаждении до температуры ниже  $T_m$  в ПЭВП формируются большие фракции упорядоченных кристаллических участков. При таком плотном молекулярном размещении получают ПЭВП с кристалличностью от 65 до 90%, обеспечивающей высокую способность ПЭВП противостоять воздействию влаги и химическому воздействию, а также его непрозрачность (коэффициент непроницаемости). Плотность ПЭВП колеблется от 0,940 до 0,965. ПЭВП наряду с ПЭНП является наиболее распространенным пластиком, используемым в упаковочной промышленности. Характеристики пленки и пластмасс *HDPE* приведены в табл. 8.5, а соотношение между плотностью ПЭ и его проницаемостью для воды и кислорода — в табл. 8.6.

**Варианты применения.** За счет выдувного формования изготавливается тара, предназначенная для хранения молока, моющих и отбеливающих веществ, воды и сока, а также бочки для хранения промышленных химикатов. Посредством опрессовки под давлением изготавливаются ведра, тонкостенная тара для хранения молочных продуктов, в то время как фармацевтические пузырьки, баллоны для дезодорантов, упаковки для шампуней изготавливаются за счет выдувного формования под давлением. Пленки, полученные методом экструзии с раздувом, и пленки, отлитые из раствора, используются для изготовления упаковок. ПЭВП заменяет пергамин при упаковке крупяных продуктов, крекеров и закусок.

Таблица 8.5. Характеристики пленки и пластмасс из ПЭВП

Температура плавления	125–130 °С
Температура стеклования	–100 °С
Удельная масса	0,940–0,965
Предел прочности при растяжении	22–32 кПа
Модуль упругости	90–124 МПа
Модуль изгиба при 23 °С	1000–1550 кПа
Проницаемость:	
для H <sub>2</sub> O при 37,8 °С	16–94 <sup>a</sup>
для O <sub>2</sub> при 25 °С	390–1750 <sup>b</sup>
для CO <sub>2</sub> при 25 °С	2300 <sup>b</sup>
для N <sub>2</sub> при 25 °С	160 <sup>b</sup>
Сопротивление воздействию:	
кислот	Хорошее
щелочей	Хорошее
масла и смазок	Хорошее
воды	Хорошее

<sup>a</sup> — в г · мкм/(м<sup>2</sup> · сут · кПа); <sup>b</sup> — в л (STP) · мкм/(м<sup>2</sup> · сут · кПа).

Таблица 8.6. Влияние плотности на водо- и кислородопроницаемость ПЭ

Плотность полиэтилена	Водопроницаемость, г · мкм/(м <sup>2</sup> · сут · кПа)	Кислородопроницаемость, г · мкм/(м <sup>2</sup> · сут · кПа)
0,910	94	1750
0,915	84	1630
0,920	74	1440
0,925	63	1280
0,930	50	1050
0,935	40	880
0,940	30	660
0,945	26	580
0,950	23	490
0,955	20	450
0,960	16	390

Этот тип ПЭ используется также для упаковки деликатесных продуктов и изготовления пакетов. FDA допустило использование ПЭ при его непосредственном контакте с пищевыми продуктами, что подтверждается в 21 CFR, раздел 177.1520.

**Производители линейного ПЭ и ПЭВП.** Кроме тех компаний, которые были перечислены в качестве производителей ПЭ с разветвленной структурой, следует назвать следующие: *Federal Plastics Co* (г. Кранфорд, штат Нью Джерси), *Hoechst Celanese Corporation* (г. Катхэм, штат Нью Джерси), *Novacor Chemicals Limited* (г. Кал-

гари, Канада), *Paxon Polymers Co* (г. Батон Руж, штат Луизиана), *Shulman Inc.* (г. Акрон, штат Огайо), *Solvay Polymers Inc.* (г. Хьюстон, штат Техас).

### 8.3.1.2 Полипропилен

Полипропилен (ПП) представляет собой группу термопластичных линейных полимеров, основанных на полимеризации мономера пропилена ( $\text{CH}_2=\text{CHCH}_3$ ). Полипропилен применяется в качестве гомополимера ПП и статистического (случайного) сополимера ПП. Последний изготавливается за счет добавления в процессе полимеризации небольшого количества этилена (от 2 до 5%). Термопластичные полимеры ПП отличаются своей низкой плотностью (0,89 до 0,92), а также хорошим сопротивлением химической и механической усталости. В упаковочной промышленности ПП используется для изготовления пленок, чашек, подносов, крышек и другой тары. Изготовители постоянно предлагают типы полипропилена, обладающие улучшенными или измененными характеристиками. *FDA* разрешило использование ПП при непосредственном контакте с пищевыми продуктами, что подтверждает 21 *CFR*, раздел 177.1520.

#### 8.3.1.2.1 Гомополимер ПП

**Общая информация.** В зависимости от типа катализатора и условий полимеризации молекулярная структура получающегося полимера состоит из трех различных типов стереоконфигураций виниловых полимеров, а именно изостатической (стереорегулярной), синдиотактической (изменяющейся стереорегулярной) и стереобеспорядочной (случайной) [36]. Промышленные процессы разработаны таким образом, чтобы свести к минимуму производство атактического ПП, который представляет собой некристаллический липкий побочный продукт, используемый в основном в связывающих веществах. Металлоценовый полипропилен (мПП) является новым поколением ПП, в котором контролируется баланс, сохраняемый между изостатическим и атактическим типами сомономеров, то есть между средним молекулярным весом и распределением молекул. Тара, изготовленная с использованием ПП, имеет более тонкие стенки при сохранении той же жесткости при очень высоких значениях температур плавления.

Изостатический ПП (изоПП) является наиболее распространенным в промышленности типом гомополимера ПП. Размещение метиловых групп на одной стороне основания полимера обеспечивает получение вещества с высокой кристаллическостью. Кристаллическая природа изостатического ПП гарантирует материалу высокую сопротивляемость химическому воздействию и воздействию тепла, но лишает его светопрозрачности (прозрачности). В сравнении с ПЭНП и ПЭВП ПП обладает меньшей плотностью, более высокой температурой плавления и большей жесткостью (более высокий модуль упругости). Эти свойства определяют различия в применении гомополимеров ПП. Например, более высокое значение жесткости и простота ориентации позволяют использовать гомополимеры при изготовлении материалов, требующих растяжения, тогда как их более высокая сопротивляемость воздействию тепла позволяет стерилизовать тару из этого материала в автоклавах.

**Свойства.** По сравнению с ПЭ изостатический ПП более чувствителен к окислительному разрушению, вызываемому светом и теплом. Окислительное разрушение

**Таблица 8.7. Свойства пленок и пластмасс  
из двухосно-ориентированного полипропилена**

Температура плавления, °С	160–175
Температура стеклования, °С	–20
Удельная масса	0,895–0,910
Предел прочности при растяжении, мПа	31–42
Модуль упругости, мПа	1140–1550
Прочность на изгиб, мПа	42–55
Модуль изгиба, 23 °С, мПа	1170–1725
Сопротивление на разрыв, кН/м	386–579
Исходная прочность на разрыв, кН/м	0,53–1,75
Проницаемость:	
для Н <sub>2</sub> О при 37,8 °С	16,5–26 <sup>a</sup>
для О <sub>2</sub> при 25 °С	622 <sup>б</sup>
для СО <sub>2</sub> при 25 °С	2100 <sup>б</sup>
для N <sub>2</sub> при 25 °С	78 <sup>б</sup>
Сопротивление воздействию:	
кислот	Хорошее
щелочей	Хорошее
масла и смазок	Хорошее
воды	Отличное

<sup>a</sup> — в г · мкм/(м<sup>2</sup> · сут · кПа); <sup>б</sup> — в мл (STP) · мкм/(м<sup>2</sup> · сут · кПа).

может привести к разрыву цепи, что снижает средний молекулярный вес и ухудшает качество полимера с химической точки зрения. Для управления этим процессом в процессе обработки добавляются антиокислители. Другими добавками, вводимыми в процессе обработки ПП, являются антистатические вещества, обычно используемые в упаковочной промышленности для рассеивания электростатических зарядов (см. раздел 8.4). Свойства ПП приведены в табл. 8.7.

Ориентация полипропиленовых пленок улучшает их прочность, прозрачность, глянец (блеск) в сравнении с неориентированными пленками из ПП (см. табл. 8.8). Пленка из ориентированного ПП (ОПП) может служить основой для самых разных материалов — она может быть металлизирована, соэкструдирована и ламинирована, на нее может быть нанесено покрытие, а для специального использования она даже может быть покрыта силикагелем и окисью алюминия.

**Варианты применения.** ОПП с органическим покрытием используется для упаковки конфет, печенья и закусок, то есть в тех случаях, когда необходимы хорошая обрабатываемость материала, низкие коэффициенты трения (от 0,2 до 0,3), привлекательный внешний вид и рентабельность.

С целью защиты вкусовых качеств и при упаковке продуктов, чувствительных к запахам (например, плиток шоколада), может быть выбрана ориентированная полипропиленовая пленка (ПП-пленка) с покрытием из ПВДХ. Металлизированная пленка из ОПП, обладающая высокими защитными свойствами, увеличит срок хранения продуктов, чувствительных к воздействию кислорода (например, чипсов с низкой жирностью, орехов и сушеных фруктов). В тех случаях, когда пакеты разме-

Таблица 8.8. Воздействие ориентации макромолекул на свойства пленки из ПП

	Неориентированный ПП	ОПП
Водопроницаемость, $\text{г} \cdot \text{мкм}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут} \cdot \text{кПа}), 37^\circ\text{C}$	60	25
Жесткость	Очень низкая	Высокая, сходная с целлофаном
Прочность на разрыв	Высокая	Очень низкое в поперечном направлении, очень высокое в продольном направлении
Способность к термосклеиванию	Имеется при $350-450^\circ\text{F}$	Отсутствует, пленка рвется
Плотность	0,902	Без изменений
Оптические свойства	Хорошие	Отличные
Адгезивность поверхности при нанесении краски	Низкая	Низкая
Проницаемость кислородом $\text{мл} (STP) \cdot \text{мкм}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут} \cdot \text{кПа})$ при $25^\circ\text{C}$	930	620

щаются в ящиках с вкладышем в форме мешка, например, при фасовке, изготовленных из круп продуктов, крекеров, супов, ОПП-пленка является подходящим материалом для устойчивых пакетов [43].

Температура плавления ПП составляет  $163^\circ\text{C}$ , и поэтому использование его в микроволновых печах ограничено разогревом. Кроме того, ПП представляет собой превосходный материал для опрессованных под давлением крышек, предназначенных для бутылок, изготовленных из ПЭВП, ПЭТ и стекла. Примерами крышек из ПП являются типы крышек *Plastic-lug*, *Double-lok* и *Drip-lok* [2]. Двухсторонние двухосно-ориентированные ПП-пленки (ДОПП) с органическим (акриловым) покрытием могут быть подвергнуты термосклеиванию, они светопроницаемы (прозрачны), глянцевые и отлично защищают вкусовые качества продуктов. Температуры термосклеивания материала колеблются в диапазоне от  $93$  до  $145^\circ\text{C}$ , при этом прилипаемость при высоких температурах достаточно высока. Кроме того, пленки обладают улучшенной жесткостью. ОПП используется для изготовления упаковок пластинок в термоусадочной пленке, упаковок для игрушек, игр, аппаратуры, замороженных пищевых продуктов и сигарет [35].

#### 8.3.1.2.2 Сополимеры полипропилена

По сравнению с гомополимерами, сополимеры ПП обладают абсолютно иными термическими свойствами. Как следует из табл. 8.9, сополимеры имеют меньшую температуру термосклеивания, более низкую температуру теплоотвода при термоформовании, и способны лучше выдерживать хранение при температуре ниже нуля. Случайный сополимер ПП, как правило, содержит от 1,5 до 7% этилена при массе, равной массе сомономера. Добавка этилена, произвольно размещаемого в основании цепи, снижает высокую кристалличность изостатического ПП. Результатом сниже-

Таблица 8.9. Значения температуры термосклеивания  $T_g$  и температура отвода тепла для этилена, содержащего ПП

Содержание этилена, %масс.	Максимальная температура термосклеивания <sup>a</sup>	$T_g$ , °C	Температура отвода тепла <sup>b</sup> , °C
0	163	6	115
2	152	2,5	95
4	143	-2	80
6	138	-6	64
8	125	-9	46
9	120	-11	40

<sup>a</sup> — температура плавления; <sup>b</sup> — АТ = 66 фунтов/дюйм.  
По [10].

ния кристалличности становится улучшение прозрачности и эластичности, а также уменьшение температуры плавления. Плотность также уменьшается и составляет от 0,89 до 0,90, что является показателем того, что случайный сополимер несколько легче гомополимера. Случайный сополимер ПП обладает хорошей ударной вязкостью, и по сравнению с гомополимером ПП в меньшей степени подвержен воздействию температуры. Такие сополимеры доказали свою хорошую устойчивость по отношению к химическому воздействию на них кислот, щелочей, спиртов и легкокипящих углеводородов (за исключением ароматических).

**Варианты применения.** Случайные сополимеры ПП используются в качестве пленок, а также выдутых и опрессованных компонентов. Они применяются для упаковки медикаментов и пищевых продуктов, выпечки и сельскохозяйственных продуктов. Соплимер с 7%-ным содержанием этилена используется в качестве удерживающей тепло прокладки при упаковке пищевых продуктов. Неориентированные пленки, как правило, мягкие и легко поддаются термосклеиванию.

**Созэкструзированная термоформованная тара.** Термоформованная, многослойная тара из отлитых из раствора листов используется для упаковки продуктов, стабильных в хранении и поддающихся стерилизации. Сюда можно отнести, например, разогреваемые в микроволновой печи обеды, готовые пудинги, приготавливаемое в микроволновой печи детское питание, яблочное пюре, пищевые добавки для пожилых людей и даже корма для домашних животных. Другие варианты ее использования — это упаковка в регулируемой газовой среде мяса, а также медицинских и фармацевтических изделий.

Как правило, созэкструзированные конструкции изготавливаются из 5, 7 или 9 слоев. Они состоят из следующих симметрично расположенных компонентов: полиолефин/измельченный слой/связующий слой/защитный слой/измельченный слой/полиолефин. Защитный слой, как правило, состоит из ПВХ и ПВХДХ.

**Поставщики ПП:** *American Polymers* (г. Ворчестер, штат Массачусетс), *Amoco Chemicals* (г. Чикаго, штат Иллинойс), *Aristech Chem Corp.* (г. Питтсбург, штат Пенсильвания), *Bamberger Polymer Inc.* (г. Суссекс, штат Нью Йорк), *ComAlloy Inter-*

*national Co* (г. Нэшвилл, штат Теннесси), *Exxon Chemical* (г. Хьюстон, штат Техас), *Federal Plastics Co* (г. Кранфорд, штат Нью Джерси), *Fina Oil & Chemical Inc.* (г. Даллас, штат Техас), *Monmouth Plastics Inc* (г. Асбури Парк, штат Нью Джерси), *Montell Polyolefins* (г. Вилмингтон, штат Делавер), *Philips Chemical Co.* (г. Бартлесвиль, штат Техас), *Quantum Chemical Corp.* (г. Цинцинатти, штат Огайо), *Rexene* (г. Даллас, штат Техас), *Schulman Inc.* (г. Экрон, штат Огайо), *Shell Chemical* и *Solvay Polymers Inc.* (г. Хьюстон, Техас) и *Washington Penn Plastic Co.* (г. Вашингтон, штат Пенсильвания).

### 8.3.1.3 Металлоцены

Как следует из раздела 8.2.1, местно-катализируемые полимеры (SSC, *single-site catalyst*) отличаются низким показателем *MWD* и распределения состава. Это означает, что все молекулы полимеров в одном месте имеют сходное количество боковых ответвлений сомономеров по всей цепи полимера. В 1992 г. компания *Exxon* представила металлоценовые пластомеры (под названием *EXACT®*) с плотностью от 0,860 до 0,915 и молекулярной массой от 40 000 до 120 000. Полиолефиновые пластомеры с использованием полимеров *SSC* изготавливаются компанией *Dow Chemical* и носят название *AFFINITY®*. Эти пластомеры доступны в качестве сополимеров пропилена, бутена, гексена или октена, а также термопластов. Основными характеристиками металлоценов согласно [45] являются следующие:

1. Компоненты с низкой молекулярной массой, передающие пластмассам легко экстрагируемую фракцию, удаляются. Преимуществом такого подхода является получение гораздо более беспримесной пластмассы для ее использования при контакте с пищевыми продуктами. Кроме того, это уменьшает запах и посторонний привкус.
2. Первоначальные температуры герметизации ниже, а их диапазон шире, чем при использовании ПЭВП. Эти пластмассы имеют высокую адгезию при высоких температурах, и поэтому они могут быть использованы в качестве соэкструдированного и/или смешанного слоя.
3. В сравнении с пластмассами, изготавливаемыми с использованием катализаторов *Ziegler-Natta*, механические свойства новых пластмасс (например, устойчивость к проколу и плотность) улучшаются. Кроме того, улучшаются их глянецитость и снижается потускнение из-за отсутствия в металлоценах фракции с высокой молекулярной массой.
4. Ожидается, что новые металлоцены заменят некоторые ПВХ и из них будут изготавливаться новые растягивающиеся пленки и герметизированные транспортные мешки. Кроме того, они получают распространение при упаковке пищевых продуктов, которые могут изменять вкусовые качества при различных внешних воздействиях [33]. Новые материалы могут использоваться в качестве упаковки для мяса, птицы и рыбы, которая требует низких температур герметизации, для соэкструдированных упаковки круп и выпечки, а также для ламинирования пакетов для кофе. Пластмассы *SSC* могут быть смешаны с ПЭНП и ПЭВП.



## 8.3.2 Поливинилхлорид

### 8.3.2.1 Общая информация

Поливинилхлорид (ПВХ) представляет собой гомополимер хлористого винила ( $\text{CH}_2 = \text{CHCl}$ ). В упаковочной промышленности 80% этого материала изготавливается за счет дополнительной реакции полимеризации в жидкой суспензии, в других методах используют эмульсию и раствор<sup>1</sup>. Жесткий ПВХ (используемый для изготовления труб) имеет температуру стеклования  $T_g = 82^\circ\text{C}$  и очень труден в обработке. Эластичный ПВХ, используемый в упаковочных материалах, получают за счет добавления пластификаторов. Пластификаторы представляют собой добавки, которые посредством «смазывания» на молекулярном уровне смягчают жесткие полимеры, делая их более эластичными. Они снижают  $T_g$  и температуры обработки полимера. Добавка жидкого пластификатора в ПВХ позволяет изготавливать эластичную пленку с умеренной проницаемостью кислородом.

Бутылки из ПВХ, изготовленные методом выдувного формования, изготавливаются с использованием пластифицированного ПВХ. Смешиваемость полимера с большим количеством пластификаторов дает возможность изготовления разнообразных упаковочных материалов. Составы, предназначенные для изготовления конкретных продуктов из ПВХ, как правило, запатентованы, однако непосредственный контакт материала с пищевыми продуктами в США должен быть разрешен FDA. Наиболее распространенным пластификатором, используемым для ПВХ, является DQA (ди(2-этилгексил)адипат). В процессе смешивания в ПВХ добавляются стабилизаторы, например, соли кальция или цинка, которые позволяют избежать расщепления ПВХ и сопутствующего выделения HCl. Обработка ПВХ осуществляется стандартными методами — например, опрессовкой под давлением, экструзией и выдувным формованием.

### 8.3.2.2 Свойства

ПВХ обладает хорошими прозрачностью, защитными свойствами, сопротивляемостью проколу и способностью к герметизации. Кроме того, ПВХ имеет высокую ударную вязкость и упругость. Свойства ПВХ приведены в табл. 8.10.

### 8.3.2.3 Варианты применения

Большая часть изготовленных из ПВХ-пленок используется для упаковки пищевых продуктов, в частности, мяса. Проницаемость ПВХ кислородом хорошо подходит для поддержания потребности мяса в кислороде, необходимом для сохранения мясом красного цвета и свежего внешнего вида. ПВХ также используется для упаковки свежих овощей и фруктов. Практически все производители домашней птицы в США используют ПВХ-пленки для упаковки замороженной продукции. ПВХ доступен в качестве растягивающейся пленки для оборачивания. Примерами использования

<sup>1</sup> В Европе использование ПВХ было разрешено до 2000 г. Разрешение на дальнейшее использование ПВХ не получено. Более того, законодательный институт ЕС запретил использование ПВХ. Это связано с тем, что ПВХ наносит вред здоровью человека. Продвижение этих ограничений приведет к серьезным убыткам производителей полимерной упаковки из ПВХ, так как этот материал — один из наиболее применяемых в Европе.

Таблица 8.10. Свойства пластифицированных\* пленок и пластмасс из ПВХ

Температура плавления, °С	165–170
Температура стеклования, °С	75–105
Удельная масса	1,22–1,40
Предел прочности на разрыв, кПа	9,7–2,4
Сопротивление прорыву, мил	20
Исходная прочность на разрыв кН/м	42,4–112
Температура термосклеивания, °С	143–160
Проницаемость:	
для H <sub>2</sub> O при 37,8 °С	330–2000 <sup>a</sup>
для O <sub>2</sub> при 25 °С	389–3900 <sup>b</sup>
для CO <sub>2</sub> при 25 °С	1170–2330 <sup>b</sup>
Сопротивление воздействию:	
кислот	Хорошее
щелочей	Хорошее
масла и смазок	Удовлетворительное
воды	Отличное

\* Каландрированных и экструдированных; <sup>a</sup> — в (г · мкм)/(м<sup>2</sup> · сут · кПа);

<sup>b</sup> — в [мл (STP) · мкм]/(м<sup>2</sup> · сут · кПа).

По [35a].

ПВХ при упаковке могут служить бутылки для молока и молочных продуктов, растительных масел, косметики, моющих средств, масла и маргарина, а также крышки для коробок со свежим, замороженным и вяленым мясом, упаковки для рыбы, сельскохозяйственных и фармацевтических продуктов. ПВХ также применяется для изготовления трубок, предназначенных для переливания крови и введения внутривенных растворов, а также пакетов для их хранения.

#### 8.3.2.4 Сложности, связанные с использованием ПВХ, и требования FDA

В процессе полимеризации ПВХ в полимер преобразуется менее 100% мономера хлористого винила (МХВ). Это означает, что достаточно большое количество МХВ может не прореагировать и остаться в пластмассе. Впоследствии пластмасса подвергается обработке вакуумированием, в ходе которой МХВ удаляется. Процесс многократного вакуумирования продолжается до тех пор, пока концентрация МХВ в ПВХ не станет менее 1 ppm (1 части на млн).

ПВХ широко применяется в материалах, контактирующих с пищевыми продуктами, например, с мясом, растительным маслом и водой. FDA никогда не запрещало и не ограничивало использование ПВХ, но в середине 1970-х гг. ввиду обнаружения в нем остаточного количества МХВ, FDA выразило определенное беспокойство и не разрешило МХВ для использования при контакте с пищевыми продуктами, поскольку, как показали опыты на животных, большие дозы этого продукта канцерогенны. В настоящее время промышленно изготавливаемый ПВХ содержит очень низкую долю МХВ, а количество МХВ, которое может перейти в продукт, настолько мало, что его невозможно обнаружить аналитическими методами. Есть основания утверждать, что

концентрация МХВ в пищевых продуктах, вызванная миграцией из ПВХ-упаковок, достаточно мала, что не должно вызывать опасений.

В 1990-х гг. использование ПВХ стало предметом многих дискуссий. Некоторые европейские страны запретили использование ПВХ-упаковок из опасений, что в процессе их сжигания вырабатываются пары соляной кислоты и хлорсодержащие органические соединения (где могут находиться диоксины), которые затем попадают в окружающую среду. Это усугубляет воздействие «кислотных дождей» и представляет опасность для человека. В Японии, где большая часть отходов сжигается, была разработана технология, предотвращающая выделение таких нежелательных компонентов. Тем не менее некоторые европейские страны по-прежнему придерживаются запрета на использование ПВХ.

#### 8.3.2.5 Поставщики ПВХ (эластичного, незаполненного)

*Alpha Gary Co.* (г. Леоминстер, штат Массачусетс), *Borden, Inc.* (г. Андовер, штат Массачусетс), *Colorite Plastics Co.* (г. Ригфилд, штат Нью Джерси), *Novatec Plastics & Chemicals Co. Inc.* (г. Итонтаун, штат Нью Джерси), *Shulman Inc.* (г. Акрон, штат Огайо), *Shintech Inc.* (г. Хьюстон, штат Техас), *Synergistics Industries, Inc.* (г. Фармингдейл, штат Нью Джерси), *Teknor Apex Co.* (г. Поутукет, штат Род-Айленд), *Union Carbide Corp.* (г. Данбури, штат Коннектикут), *Vi-Chem Corp.* (г. Гранд Рапидз, штат Мичиган), *Vista Chemical Co.* (г. Хьюстон, штат Техас).

### 8.3.3 Сополимеры винилхлорида с винилиденхлоридом

#### 8.3.3.1 Общая информация

Сополимеры винилхлорида с винилиденхлоридом, известные как *Saran*® или ПВДХ, были разработаны в 1930-х гг. компанией *Dow Chemical Co.* Эти сополимеры являются результатом сополимеризации винилиденхлорида (ВДХ) ( $\text{CH}_2=\text{CCl}_2$ ) с хлористым винилом, акрилатом метила или акрилонитрилами. Многие промышленные полимеры типа *Saran* содержат два и более сомономеров. Температура плавления гомополимера ВДХ составляет от 198 до 205 °С, но распадается он уже при 210 °С, что затрудняет обработку гомополимера ВДХ (ПВДХ). За счет сополимеризации температура плавления сополимеров снижается до температур от 140 до 175 °С, что делает их плавление выполнимым. Полимер *Saran* содержит от 2 до 10% пластификатора и термостабилизаторы. Наиболее примечательным свойством сополимеров *Saran* является их чрезвычайно низкая проницаемость для газов и жидкостей, а также высокая сопротивляемость химическому воздействию, сравнительно такие же, как у полимеров ПВС.

#### 8.3.3.2 Разновидности сополимеров *Saran*®

Существуют следующие разновидности сополимеров *Saran*: полимеры-*F* (с акрилонитрилом в качестве сополимера), используемые в качестве растворимого полимера для защитных покрытий, водянистые эмульсионные латексы для защитных покрытий, и экструзионные полимеры, которые могут быть использованы в жестких многослойных контейнерах, при экструзии пленок и листов.

Полимеры-*F* включают в себя типы *F-239* и *F-278*. Эти полимеры используются для покрытия пластиковых пленок, например, целлофана и полиэстера, что позволяет добиться водопроницаемости от  $2,0 \text{ г} \cdot \text{мкм}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут} \cdot \text{кПа})$  и проницаемости кислородом примерно  $0,09 \text{ мл} \cdot \text{мкм}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут} \cdot \text{кПа})$ . *F-310* используется для покрытия бумаги. Температура термосклеивания полимеров-*F* колеблется в диапазоне от 100 до 130 °C.

Латексы применяются для покрытия мелованной бумаги или картона, а также пластиковых пленок, например, из ПП и ПЭ. Кроме того, латексом могут быть покрыты жесткие упаковки, изготовленные из таких материалов, как ПЭТ, ПВХ, ПС и ПЭ. Защитные свойства латексов схожи со свойствами полимеров-*F*.

Экструзионные полимеры используются для эластичных упаковок в однослойных и многослойных (соэкструдированных или ламинированных конструкциях). Они применяются для упаковки мяса и других пищевых продуктов. Для не замороженных продуктов в эластичной таре полимеры могут быть соэкструдированы с ПП или ПС. Экструзионные полимеры обладают худшими защитными характеристиками, чем полимеры-*F* или латексы. Пленки *Saran HB* (с хлористым винилом в качестве сополимера) имеют лучшие защитные свойства, чем полимеры-*F*, и их проницаемость кислородом доходит до значения, равного  $0,04 \text{ мкм}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут} \cdot \text{кПа})$ .

### 8.3.3.3 Варианты применения

Как уже отмечалось выше, для обработки полимеров *Saran* существуют различные методы, позволяющие получать заданные свойства упаковки для продукта. К этим методам можно отнести экструзию, соэкструзию, ламинирование и латексное покрытие. Кроме того, в промышленности получили распространение такие методы, как опрессовка под давлением, получение пленки методом экструзии с раздувом и отлив пленки из раствора. При упаковывании пищевых продуктов *Saran* используется в основном в качестве защитного материала, предотвращающего проникновение влаги, газов, привкусов и запахов. Однослойные пленки получили широкое распространение в качестве упаковок, используемых в домашнем хозяйстве.

Многослойные пленки, получаемые в основном путем соэкструзией с полиолефинами, используются для упаковки мяса, сыра и других продуктов, чувствительных к воздействию влаги и газов. Материалы, как правило, содержат от 10 до 20% сополимера ВДХ. Обычно они используются в качестве термоусадочных пленок, обеспечивающих защитный слой внутри термоформованной тары. Такая тара представляет собой соэкструдированную многослойную конструкцию и является стабильной при хранении; кроме того, она поддается стерилизации.

Промышленное использование однослойных пленок включает в себя изготовление порционных упаковок, прокладок внутри бочек и упаковок, предназначенных для хранения продуктов, чувствительных к воздействию влаги, кислорода и растворителей. Такие пленки получили распространение при упаковке косметических и фармацевтических средств. FDA разрешило использование ПВДХ для непосредственного контакта с пищевыми продуктами, что подтверждено в 21 CFR (раздел 175.105 для клейких (связующих) веществ, 175.320 — для покрытия полиолефинов, 176.170 — для бумаги, контактирующей с водянистыми и жирными пищевыми продуктами, 176.180 — для контакта с сухими пищевыми продуктами и 177.1990 — для полимеров).

**Поставщики PVDC:** *Dow Plastics* (г. Мидлэнд, штат Мичиган).

## 8.3.4 Полистирол

Полимеры, получаемые при полимеризации стирола ( $\text{CH}_2 = \text{CHC}_6\text{H}_5$ ), как и другие полимерные материалы, изготавливаются за счет использования современных технологий. Новые методы сополимеризации, добавки и смешивание делают полистирол (ПС) очень разносторонним упаковочным материалом. Полистирол гидрофобен, негигроскопичен, легко поддается экструзии и термоформованию. Существует три различных типа ПС, а именно, универсальный, ударопрочный и пенный полистирол<sup>1</sup>.

### 8.3.4.1 Универсальный полистирол (УПС)

Данный материал, известный также как кристаллический ПС, представляет собой полностью аморфный материал, не имеющий температуры плавления, обладающий высокой светопрозрачностью и отличными оптическими характеристиками. Значение  $T_g$  «кристаллического» линейного полимера ПС находится в диапазоне от 74 до 105 °C, что делает его ломким и жестким при комнатной температуре. Существуют три класса УПС — высокой степени нагрева, средней выпрессовки и высокой (прямой) выпрессовки.

Полимеры высокой степени нагрева обладают значительным молекулярным весом, содержат небольшое количество добавок (или совсем их не содержат) и являются хрупкими. Они используются в качестве экструдированной пены и термоформованных материалов, применяемых для упаковки электронных изделий, отпрессованных под давлением футляров, высококачественной упаковки косметических средств и ударопрочных футляров для компакт-дисков.

Полимеры высокой выпрессовки имеют низкий молекулярный вес и обычно содержат в качестве добавки от 3 до 4% минерального масла. Это делает кристаллический ПС более эластичным (менее хрупким) и снижает температуру деформации. Типичными вариантами применения этого материала являются изготовление одноразовых медицинских изделий, посуды и соэкструдированных листов для термоформованной тары.

Полимеры средней выпрессовки имеют средний молекулярный вес и в качестве добавки содержат от 1 до 2% минерального масла. Эти полимеры используются при изготовлении бутылок методом выдувного формования, а также в соэкструдированных материалах, применяемых при производстве упаковок для пищевых продуктов и фармацевтических средств.

### 8.3.4.2 Ударопрочный полистирол

Ударопрочный полистирол (УППС) содержит частицы резины, которые добавляются в него для повышения ударопрочности. Это позволяет получить простой в обработке непрозрачный материал, который может быть подвергнут термоформованию. Обычно этот материал применяют при упаковывании пищевых продуктов, из него изготавливают контейнеры для замороженных молочных продуктов, чашки, крышки, тарелки и чаши. Ограничивающими факторами для использования УППС являются его низкая термостойкость, проницаемость для кислорода, нестабильность

<sup>1</sup> В России ПС запрещен для применения в качестве упаковочного материала продуктов детского питания.

Таблица 8.11. Свойства пластмасс и пленок, изготовленных из ПС

Теплостойкость по Мартенсу, °С	60–70
Температура стеклования, °С	74–105
Удельная масса	1,05–1,06
Предел прочности на разрыв, мПа	14–70
Прочность на изгиб, мПа	55–100
Проницаемость:	
для H <sub>2</sub> O при 37,8 °С	460–660 <sup>a</sup>
для O <sub>2</sub> при 25 °С	970–1260 <sup>b</sup>
для CO <sub>2</sub> при 25 °С	3500
Сопротивление воздействию:	
кислот	Хорошее
щелочей	Хорошее
масла и смазок	Плохое
воды	Хорошее

<sup>a</sup> — в г · мкм/(м<sup>2</sup> · сут · кПа); <sup>b</sup> — в мл (STP) · мкм/(м<sup>2</sup> · сут · кПа).

при воздействии ультрафиолета, а также его недостаточная стойкость к воздействию масел и химикатов. В соответствии с данными [48], изготовленная из УППС тара оказывает значительное воздействие на вкусовые качества пищевых продуктов.

### 8.3.4.3 Растягивающиеся пленки из полистирола

Пена из ПС обладает хорошими амортизирующими и теплоизоляционными характеристиками. При упаковке пищевых продуктов такие пленки применяют для изготовления упаковок для яиц и мяса.

Некоторые характеристики ПС представлены в табл. 8.11. FDA разрешило использование ПС для непосредственного контакта с пищевыми продуктами, что подтверждается в 21 CFR, раздел 177.1640.

### 8.3.4.4 Поставщики гомополимера ПС

*A.E Plastics Inc.* (г. Эльк Гроув Вилледж, штат Иллинойс), *American Polymers* (г. Ворчестер, штат Массачусетс), *Amoco Chemical Co.* (г. Чикаго, штат Иллинойс), *Bamberger Polymer Inc.* (г. Сассекс, штат Нью Йорк), *BASF Corp* (г. Виандотт, штат Мичиган), *Chevron Chemical Co.* (г. Хьюстон, штат Техас), *Dow Plastics* (г. Мидленд, штат Мичиган), *Federal Plastics Co.* (г. Чизпик, штат Вирджиния), *RTP Co.* (г. Винона, штат Миннесота), *Shulman Inc.* (г. Экрон, Огайо), *Washington Penn Plastic Co* (г. Вашингтон, штат Пенсильвания).

## 8.3.5 Поливиниловый спирт

### 8.3.5.1 Общая информация

Поливиниловый спирт (ПВС) получается за счет управляемого гидролиза сополимера ЭВА. Присутствие в основной цепи группы ОН, замещающей определенное

количество атомов ОН в ПЭ, оказывает основательное воздействие на свойства полимера. Во-первых, ОН-группа полярна, что увеличивает силы межмолекулярного взаимодействия и одновременно делает материал более гидрофильным по сравнению с ПЭ. Во вторых, ОН-группа достаточно мала, чтобы придать цепи полимера достаточную стереорегулярность для формирования полимера с высоким процентом кристалличности. Даже при случайном распределении в цепи эта группа является превосходным барьером. Если процент ОН в олефиновой цепи равен нулю, то продуктом окажется ПЭ, а при 100% ВА получится поливиниловый спирт (ПВС).

По сравнению с ПЭ ПВС обладает исключительно высокими барьерными свойствами, препятствующими проникновению газов и запахов, но он очень сложен в обработке и растворим в воде. Если процент содержания винилового спирта (ВС) в ПВС колеблется от 52 до 70%, то получаемые сополимеры ВС сочетают в себе технологичность, водостойкость ПЭ и барьерные свойства ПВС, препятствующие проникновению газов и запахов. Соплимеры ЭВС высококристалличны, а их технологичность и защитные свойства изменяются в зависимости от эквивалентного процента присутствующего этилена. Если процент содержания этилена превосходит 30%, то барьерные свойства ЭВС, препятствующие проникновению газов и органических паров, исключительно высоки, однако усложняется его обработка. При увеличении процента содержания этилена возрастает водостойкость и технологичность обработки данного материала.

### 8.3.5.2 Свойства

Наиболее важной характеристикой ЭВС являются его высокие барьерные свойства, препятствующие проникновению  $O_2$  и различного рода запахов. Упаковки, содержащие ПВС, обеспечивают хорошее сохранение вкуса и качества, что обусловлено отсутствием реакции кислорода с пищевым продуктом. Кроме того, ПВС обеспечивает очень высокую устойчивость к воздействию масел и органических паров, которая может изменяться при увеличении полярности проникающего состава — например, устойчивость к линейным и ароматическим углеводородам превосходна, в то время как сопротивляемость этанолу и метанолу невысока. Следовательно, возможно поглощение до 12% этанола.

Как уже отмечалось выше, гидроксильная группа ОН делает полимер гидрофильным, то есть притягивающим молекулы воды. Наличие воды подавляет защитные свойства, препятствующие проникновению кислорода. Это усложняет задачу разработки упаковок, обладающих высокими защитными свойствами, поскольку для обеспечения защитных свойств ПВС, препятствующих проникновению  $O_2$ , требуется наличие негидрофильных внешних слоев. Некоторые свойства, присущие сополимерам ЭВС, приведены в табл. 8.12.

### 8.3.5.3 Варианты применения

ПВС может быть соэкструдирован в различных комбинациях с ПЭ или ПП, ламинирован или нанесен на различные основания, включая ПЭТ, ПЭ, нейлон и т. д. Кроме того, ПВС может прессоваться в пленки, а также обрабатываться методами выдувного формования, литься под давлением и соэкструдизироваться. Некоторые структуры приводятся в табл. 8.13.

Таблица 8.12. Некоторые характеристики сополимеров ПВС

Характеристика	ЭВС (32% этилена)	ЭВС (44% этилена)
Плотность г/см <sup>3</sup>	1,19	1,14
Предел прочности при растяжении, мПа	80	59
Прочность на разрыв, Н/м	154	193
Температура термосклеивания, °С	179–238	177–238
Проницаемость для кислорода, л · мкм/(м <sup>2</sup> · сут · кПа)	0,03 (отн. влажн. 0%) 0,2 (отн. влажн. 65%)	0,15 (отн. влажн. 0%) 0,3 (отн. влажн. 65%)
Паропроницаемость, ИПВП, г · мкм/(м <sup>2</sup> · сут · кПа) при 38 °С	250	92

Примечание: ПВС — поливиниловый спирт; ИПВП — проницаемость для водяного пара.

Таблица 8.13. Применение некоторых комбинированных материалов

Применение	Комбинированный материал
Сыр, мясо, закуски	ПЭТ/ЭВС/ЭВА-нейлон/ЭВА/нейлон/ Иономер ОПП/ЭВА/ПВС/ЭВА
Молочные и мясные продукты, кофе, приправы	Онилон-6/ЭВС/Онилон-6
Баранина, говядина	ЛПЭНП/ПВС/ЛПЭНП
Чай, приправы	ОПП/ПВС/ПЭНП
Асептическая упаковка	ПЭНП/картон/ПВС/ПП/Иономер
Йогурт	ПП/ПВС/ПП
Кетчуп	ПЭТ/ПВС/ПЭТ
Косметика	ПЭНП/ЭВС/ПЭНП
Фармацевтические средства	ПВС/ПЭНП

Примечание: ПЭТ — полиэтилентерефталат; ПВС — этиленвиниловый спирт; ЭВА — этиленвинилацетат; ПП — полипропилен; ОПП — ориентированный полипропилен; ПЭНП — полиэтилен низкой плотности; ЛПЭНП — линейный полиэтилен низкой плотности.

FDA разрешило использование ПВС при его непосредственном контакте с пищевыми продуктами с содержанием ВС до 80% (что подтверждено в 21 CFR, раздел 177.1360). Данный компонент используется при изготовлении эластичной и жесткой тары. Как правило, он применяется при производстве бутылок для кетчупов и соусов, упаковок для желе, овощных соков, майонеза и мяса. Помимо пищевой промышленности он применяется при изготовлении тары для хранения растворителей и химикатов.

#### 8.3.5.4 Поставщики

Eval Company of America (г. Лисл, штат Иллинойс), Nippon Goshei (Япония), Kurary Co. (Япония).



## 8.3.6 Нейлон

### 8.3.6.1 Общая информация

Нейлоны представляют собой конденсационные, линейные, термопластичные полиамиды, которые содержат амидную группу ( $-\text{CONH}-$ ), являющуюся повторяющейся частью цепи. Полиамиды для изготовления нейлона могут быть выработаны за счет реакции двухосновной кислоты с диамином или же полимеризацией аминокислот (например, капролактама-ε) [25].

### 8.3.6.2 Свойства

Как правило, нейлоны представляют собой прозрачные, поддающиеся термоформованию очень прочные вещества (в широком диапазоне температур). Они являются хорошим барьером на пути газов, масел и запахов (табл. 8.14). Нейлоны представляют собой полимеры с ярко выраженными силами межмолекулярного взаимодействия, осуществляемыми за счет наличия водородной связи между группами  $-\text{C}=\text{O}$  и  $\text{HN}-$  различных цепей. Эти ярко выраженные силы межмолекулярного взаимодействия сочетаются с кристалличностью, в результате чего получаются жесткие тугоплавкие термопластичные вещества. Например, температура плавления нейлона 6,6 составляет  $269^\circ\text{C}$ . Кроме того, нейлоны обладают высокой прочностью на прокол, ударной вязкостью и температурной стабильностью, а гибкость алифатической части цепи способствует такой ориентации пленки, которая улучшает ее прочность. За счет реакции сомономеров (например, двух различных двухосновных кислот) возможно получение аморфных нейлонов, например, 6I/6T (*Selar*<sup>®</sup>, торговая марка фирмы *DuPont*). 6I/6T представляет собой сополимер адипамина гексаметилен и изофталевой и терефталевой кислот [5].

Таблица 8.14. Свойства пленки и полимера «Нейлон 6»

Температура плавления, $^\circ\text{C}$	210–220
Удельная масса	1,12
Предел прочности при растяжении <sup>а</sup> , МПа	41,4–166
Модуль эластичности, жесткости <sup>а, б</sup> , кПа	690–1700
Прочность на изгиб <sup>а, б</sup> , кПа	400
Модуль изгиба <sup>а, б</sup> при $23^\circ\text{C}$ , кПа	966
Проницаемость:	
для $\text{H}_2\text{O}$ при $37,8^\circ\text{C}$	660–620 <sup>в</sup>
для $\text{O}_2$ при $25^\circ\text{C}$	10,0 <sup>г, д</sup> –5,1 <sup>г, е</sup>
для $\text{CO}_2$ при $25^\circ\text{C}$	39–47
для $\text{N}_2$ при $25^\circ\text{C}$	3,5
Сопротивление воздействию:	
кислот	Плохое
щелочей	Удовлетворительное
масла и смазок	Отличное

<sup>а</sup> — для расплавляемого и экструзионного компонента; <sup>б</sup> — в приведенном к равновесию состоянию при отн. влажности 50%; <sup>в</sup> — в г · мкм/(м<sup>2</sup> · сут · кПа); <sup>г</sup> — в мл (STP) · мкм/(м<sup>2</sup> · сут · кПа); <sup>д</sup> — расчетная величина; <sup>е</sup> — биаксиально ориентированный.

Поскольку амидная группа полярна, нейлоны чувствительны к воздействию влаги (они гидрофильны). При нахождении в нормальной для них среде, то есть при 65–80% относительной влажности, нейлоны в зависимости от их химического состава легко могут поглощать воду (от 6 до 8% своей массы). Сорбционные изотермы Нейлона 6 и аморфного нейлона 6I/6Т при трех температурах представлены в [18]. Количество воды в образце нейлона может быть представлено с помощью сорбционной изотермической кривой как функция относительной влажности.

На проницаемость нейлонов для кислорода влияет содержание в них влаги и температура. Как показано на рис. 8.2 и 8.3, в полукристаллических нейлонах (Нейлон 6) проницаемость для кислорода возрастает при содержании активной влаги свыше 30–40%, тогда как в аморфных нейлонах 6I/6Т после снижения до 0% она остается значимой [18].

### 8.3.6.3 Варианты применения

Нейлоны могут быть обработаны плавлением с использованием стандартной экструзии. Пленка может изготавливаться либо ее литьем из раствора, либо получаться за счет экструзии с раздувом. В процессе изготовления пленки в зависимости от скорости охлаждения возможно получение различных степеней кристалличности. При увеличении скорости охлаждения получается менее кристаллический нейлон, поскольку у полимера не достаточно времени для образования кристаллов. Двухосная ориентация нейлоновых пленок обеспечивает улучшение светопрозрачности (прозрачности), сопротивление распространению трещин, хорошие механические характеристики и барьерные свойства. Увеличение аморфности позволяет получить пленку с улучшенной светопрозрачностью и способностью к термоформованию.

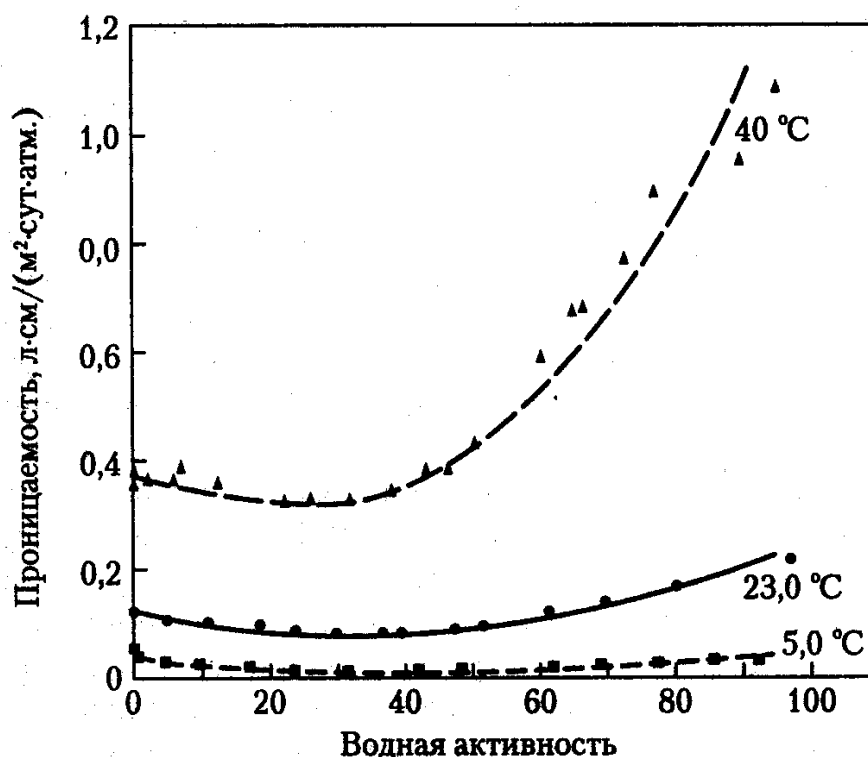


Рис. 8.2. Проницаемость Нейлона 6 для кислорода  
По [18].

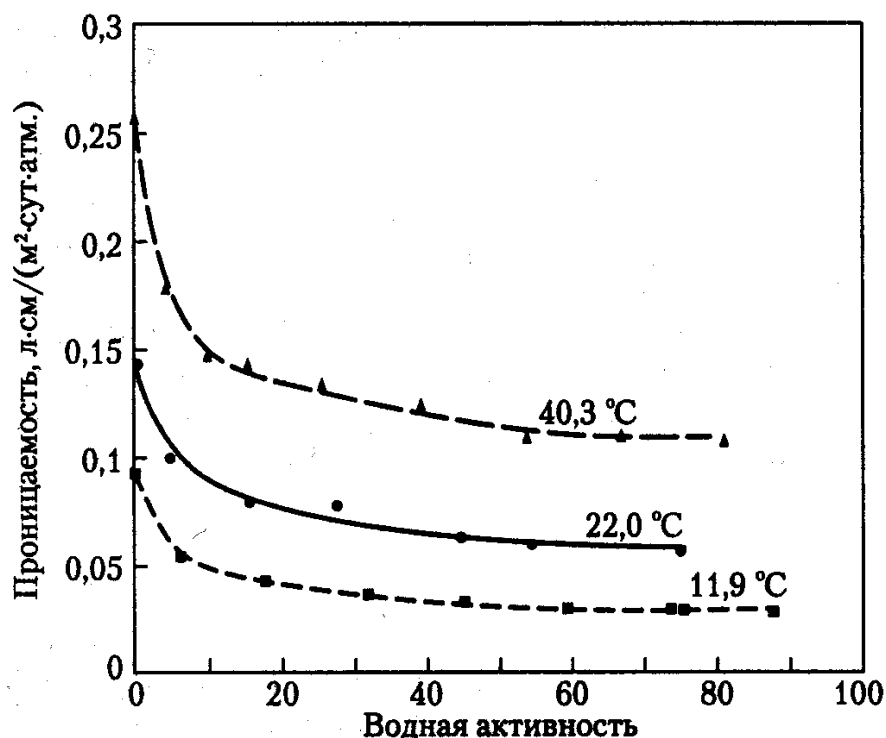


Рис. 8.3. Проницаемость Нейлона 6I/6Т для кислорода  
По [18].

Нейлоны используются в процессе соэкструзии с другими пластмассами, что обеспечивает структуре прочность и ударную вязкость. При соэкструзии нейлонов, как правило, используются полиолефины, что гарантирует способность материала к термосвариванию, обеспечивает их влагостойкость. Нейлон используется для нанесения покрытия на картон методом экструзии, что позволяет получить высокопрочный картон.

Для изготовления промышленной тары нейлон используется в процессе выдувного формования. Подвергшийся термоформованию нейлон применяется для изготовления одноразовых медицинских инструментов, упаковок для мяса и сыра, а также термоформованных упаковок.

Важными характеристиками нейлонов, которые используются в процессе упаковки, являются их прекрасная способность к термоформованию, сопротивляемость изгибу и распространению трещин, сопротивление изнашиванию, хорошие защитные свойства от воздействия смазочных материалов и посторонних запахов, а также механическая прочность (на изгиб, разрыв и ударное воздействие) при температуре до 200 °C.

При упаковке пищевых продуктов наиболее широкое распространение получили Нейлон 6 и Нейлон 6,6. FDA одобрило нейлон для его непосредственного контакта с пищевыми продуктами (21 CFR, раздел 177.1500). В большинстве случаев их применения нейлоны сочетаются с другими веществами, которые представляют собой дополнительный барьер воздействию влаги и улучшают способность нейлонов к термосвариванию. Такими веществами могут быть, например, ПЭНП, ионосодержащий полимер, ЭВС. Многослойные пленки с нейлоновым слоем используются главным образом при вакуумном упаковывании бекона, сыра, болонской копченой колбасы, сосисок и других предварительно обработанных мясных продуктов. Соэкструзия (например, Нейлон 6/ЭВС/Нейлон 6) обеспечивает единственное в своем роде со-

четание механических и защитных свойств. Полученные на основе нейлона структуры используются при упаковывании домашней птицы, рыбы и свежего мяса.

#### 8.3.6.4 Поставщики Нейлона 6

Поставщиками Нейлона 6 как компонента для экструзии и формования являются следующие фирмы: *Addell Inc.* (г. Балтимор, штат Массачусетс), *Allied Signal Inc.* (г. Морристаун, штат Нью Джерси), *ALM Co.* (г. Вэйн, штат Нью Джерси), *Ashley Polymers Inc.* (г. Бруклин, штат Нью Йорк), *BASF Co.* (г. Вайандотт, штат Мичиган), *Bamberger Polymers Inc.* (г. Сассекс, штат Нью Йорк), *Bayer Co.* (г. Питтсбург, штат Пенсильвания), *Com Alloy International Co.* (г. Нэшвилл, штат Теннесси), *Custom Resins Division of Bemis Co.* (г. Хендерсон, штат Кентукки), *DuPont Co.* (г. Вилмингтон, штат Делавэр), *EMS, Inc.* (г. Самтер, штат Южная Каролина), *Hoechst Celanese Co.* (г. Ка-там, штат Нью Джерси), *Nylon Corporation of American* (г. Манчестер, штат Нью-Гемпшир), *Polymer Resources* (г. Фармингтон, штат Коннектикут), *Polymers International Inc.* (г. Спартанбург, штат Южная Каролина), *A. Shulman Inc.* (г. Экрон, штат Огайо), *Texarol Co.* (г. Бетлеем, штат Пенсильвания), *Thermofil, Inc.* (г. Брайтон, штат Мичиган).

### 8.3.7 Полиэтилентерефталат (ПЭТФ)

#### 8.3.7.1 Общая информация

ПЭТФ представляет собой линейный термопластичный полимер, получаемый при реакции поликонденсации этиленгликоля и терефталевой кислоты. Высокая степень стереорегулярности полимера обеспечивается за счет ступенчатого протекания реакции, поэтому ПЭТФ является полукристаллическим полимером.

Гомополимер ПЭТФ превратился в имеющий большое значение упаковочный материал, положительно зарекомендовавший себя при изготовлении пленок для упаковывания пищевых продуктов и бутылок для розлива газированных напитков. Сополимеризация с другими мономерами позволяет получить полиэфирные полимеры, имеющие различную степень кристалличности, включая аморфный материал, который используется при изготовлении тары (контейнеров) и лотков.

#### 8.3.7.2 Свойства

Широкое распространение ПЭТФ в качестве упаковочного материала для изготовления бутылок, предназначенных для газированных напитков, объясняется его прочностью, ударной вязкостью, прозрачностью, способностью к ориентированию, приемлемой ценой, а также развитием высокоскоростной технологии обработки бутылок. Изготовленная из ПЭТФ тара имеет небольшую массу, она стойка к раздроблению, обладает хорошими защитными свойствами и может быть использована повторно. ПЭТФ получают за счет конденсации двухосновной кислоты и диметилового эфира. Ориентированный ПЭТФ обладает высокой прочностью, хорошей ударной вязкостью и прозрачностью. Он способен противостоять воздействию слабых кислот, оснований, и многих растворителей (табл. 8.15).

Наличие влаги в процессе экструзии ПЭТФ делает реакцию конденсации обратимой и до некоторой степени осуществляет деполимеризацию. До начала процесса экструзии ПЭТФ должен быть высушен для удаления молекул воды. Для сведения

Таблица 8.15. Свойства полимеров и пленок ПЭТФ

Температура плавления, °C	212–265
Температура стеклования, °C	70–80
Удельная масса	1,35–1,41
Предел прочности при растяжении, мПа	48,3–72,5
Модуль эластичности, жесткости, мПа	2760–4140
Прочность на изгиб, мПа	83–124
Модуль изгиба при 23 °C, мПа	2400–3100
Прочность на разрыв, мил	55–80
Исходная прочность на растяжение, кН/м	79,3–116
Развивающаяся прочность на растяжение, кН/м	175–525
Проницаемость:	
для H <sub>2</sub> O при 37,8 °C	66–86 <sup>a</sup>
для O <sub>2</sub> при 25 °C	11,6–23,3 <sup>b</sup>
для CO <sub>2</sub> при 25 °C	58,3–97,1 <sup>b</sup>
для N <sub>2</sub> при 25 °C	2,7–3,9 <sup>b</sup>
Сопротивление воздействию:	
кислот	Хорошее
щелочей	Плохое
масел и смазок	Хорошее
воды	Хорошее

Примечание: <sup>a</sup>—вг·мкм/(м<sup>2</sup>·сут·кПа); <sup>b</sup>—вмл(STP)·мкм/(м<sup>2</sup>·сут·кПа).  
По [35a].

к минимуму гидролитической деструкции и потери нужных свойств содержание влаги должно составлять менее 0,005%. Пленка может быть изготовлена с использованием охлаждающего вала. Для изготовления бутылок используется метод опрессовки под давлением. Для соответствия требованиям FDA прессуемый материал должен быть чистым.

### 8.3.7.3 Варианты применения

ПЭТФ используется при изготовлении упаковок для пищевых продуктов, очищенных перегонкой спиртов, газированных безалкогольных напитков, негазированных напитков и косметики. FDA разрешило использование ПЭТФ при его непосредственном контакте с пищевыми продуктами (CFR 21, раздел 177.1315). Типичными упаковываемыми в ПЭТФ пищевыми продуктами являются горчица, маринады, арахисовое и другие растительные масла, специи и сиропы. ПЭТФ интенсивно используется для нанесения покрытий методом экструзии, а также для экструзии в пленку и листы. Его кристаллическая форма (КПЭТФ) — основа для изготовления упаковок, которые могут быть использованы в духовках. Двухосно-ориентированный ПЭТФ применяется при упаковке мяса и сыра. Распространенная операция при работе с листами ПЭТФ — термоформование. Кроме того, из него изготавливают упаковку для пищевых продуктов, разогреваемых в духовке, выдерживающих кипячение и поддаю-

щихся стерилизации вместе с упаковкой. Поскольку пищевая промышленность продолжает совершенствоваться технологии изготовления малоокислотных и специфических блюд, асептическая упаковка может стать важной составной частью на рынке сбыта многослойной, обладающей защитными свойствами тары (например, ПЭТФ/ПВС/ПЭТФ).

FDA разрешило использование ПЭТФ, восстановленного из вторичного сырья и прошедшего строго контролируемый механический или химический процесс переработки. Поэтому предполагается, что его применение при изготовлении многослойных упаковок для пищевых продуктов может снизить затраты на изготовление поддающихся термоформованию листов. На стадии разработки находится трехслойная листовая конструкция из аморфного ПЭТФ, основной слой которой на 60–70% состоит из измельченного материала. Такая тара предназначена для упаковки выпечки и замороженных пищевых продуктов. Поскольку ПЭТФ способен противостоять более высоким температурам стерилизации (127–135 °C), чем сополимер ПП (121 °C), трехслойный аморфный лист может быть использован для изготовления поддающейся стерилизации асептической тары [49].

#### 8.3.7.4 Термопластичные сополиэфиры

Название «сополиэфиры» относится к тем полиэфирам, синтез которых осуществляется при использовании более одного гликоля и/или более одной двухосновной кислоты. Цепь сополиэфира менее регулярна, чем цепь гомополимера, а степень его кристаллизации ниже, причем некоторые из них аморфны. ПЦТА — это полимер циклогексанэдиметанола (ЦГЭДМ) и терефталевой/изофталевой кислот. Этот аморфный полиэфир разработан в первую очередь для образования и листования пленки, предназначенной для упаковывания пищевых продуктов, изделий фармацевтической промышленности, и в основном для изготовления блистерной упаковки. ПЭТ-Г изготавливают из CHDH, гликоля и терефталевой кислоты. ПЭТ-Г (с  $T_g$  около 81 °C) представляет собой глянцевый прозрачный, прочный материал с высокой ударной вязкостью, выдерживающий стерилизацию гамма-излучением и пригодный для повторной утилизации.

#### 8.3.7.5 Нафталат полиэтилена

Нафталат полиэтилена (ПЭН) представляет собой последнее слово в перечне полиэфиров. Использование этого материала в упаковке связано в основном с производством напитков. ПЭН является прозрачным материалом (хотя и менее прозрачным, чем ПЭТ) и обладает улучшенными защитными свойствами, препятствующими проникновению газов. Постоянная проницаемости ПЭН для кислорода в пять раз ниже той же постоянной для ПЭТ.  $T_g$  этого материала достигает почти 120 °C (то есть на 43° выше температуры ПЭТ). Кроме того, этот материал по сравнению с ПЭТ более прочный и жесткий. Перечисленные свойства делают ПЭН весьма пригодным для горячих наполнителей, а также прекрасным материалом для хранения газированных напитков. Ввиду поглощения ультрафиолетового излучения ПЭН способен обеспечить дополнительную защиту продуктам, чувствительным к воздействию ультрафиолетового излучения. Пластмассы ПЭН в настоящее время дороже пластмасс ПЭТ. Они могут быть обработаны с использованием методов выдувного формования.

ния, опрессовки под давлением и экструзии. Тара, изготовленная из этого материала, является возвратной и может быть использована повторно.

#### 8.3.7.6 Поставщики

К поставщикам ПЭТФ и незаполненных сополиэфиров относятся следующие фирмы: *DuPont* (г. Вашингтон, штат Делавэр), *Eastman Chemical Co.* (г. Кингспорт, штат Теннесси), *Hoechst Celanese Co.* (г. Четхэм, штат Нью Джерси), *A. Shulman, Inc.* (г. Экрон, штат Огайо), *Shell Chemical Oil Co.* (г. Хьюстон, штат Техас), *Texapol Co.* (г. Вифлеем, штат Пенсильвания).

### 8.3.8 Поликарбонаты

Поликарбонаты (ПК) — это стекловидный, аморфный термопластичный материал. Поликарбонат представляет собой гидрофильный полимер, и в условиях окружающей среды содержание в нем влаги может достигать 0,35%. Он обладает превосходным сочетанием ударной вязкости и прозрачности. Температура стеклования — 149 °С. Основными областями применения ПК являются автомобильная и приборостроительная промышленности. Этот материал можно использовать для изготовления упаковки.

В настоящее время ПК получают в результате реакции бифенола-А и хлористого карбонила. Наиболее впечатляющее свойство ПК — ударная вязкость. Данный материал используется для изготовления школьных окон и спортивного инвентаря. Ударная прочность и прозрачность ПК делают его весьма подходящим материалом для изготовления оборотной тары (бутылок), особенно вместимостью 19 л. Для поддающихся утилизации бутылок из ПК были разработаны специальные моющие установки. Изготовленные из ПК пленки не обладают запахом, вкусом, они не пачкаются в результате обычного соприкосновения с естественными или синтетическими красителями.

Поликарбонаты обладают хорошей стойкостью к фруктовым сокам, алифатическим углеводородам и водным растворам этанола, но разъедаются некоторыми растворителями, например, ацетоном или диметилэтилкетон. Поскольку ПК является материалом, разрешенным *FDA* для контакта с пищевыми продуктами, из него изготавливается тара, способная выдерживать нагрев в микроволновой печи и духовке, а также контейнеры, предназначенные для хранения пищевых продуктов.

В европейских странах использование ПК для упаковки сводится в основном к изготовлению тары для хранения хлеба, мучных кондитерских изделий, мяса и плавленого сыра. Из данного материала изготавливают упаковки для горячих начинок, вакуумные упаковки, жесткую тару (в качестве заменителя ПВХ). Кроме того, ПК применяются для придания глянца бумаге и изготовления защитного слоя для упаковок с соком.

Поликарбонаты применяются и при изготовлении упаковок для медицинских инструментов. ПК может подвергаться стерилизации при автоклавировании, гамма-стерилизации или с использованием окиси этилена. Способы обработки ПК включают в себя опрессовку под давлением, экструзию, соэкструзию и выдувное формование. Соэкструзия с ПВХ или полиамидами осуществляется при помощи

связывающих веществ. ПК может быть ламинирован или подвергнут соэкструзии с ПП, ПЭ, ПЭТФ, ПВХ и ПВДХ.

### 8.3.8.1 Поставщики

Поставщиками ПК являются *Albis Co.* (г. Розенберг, штат Техас), *American Polymers* (г. Ворчестер, штат Массачусетс), *Ashley Polymers Inc.* (г. Бруклин, штат Нью Йорк), *Bamberger Polymers Inc.* (г. Сассекс, штат Нью Йорк), *Bayer Co.* (г. Питсбург, штат Пенсильвания), *Dow Plastics* (г. Мидлэнд, штат Мичиган), *Federal Plastics Inc.* (г. Крэнфорд, штат Нью Джерси), *General Electric Plastics* (г. Питсфилд, штат Массачусетс), *MRC Polymers*, *Polymer resources* (г. Фармингтон, штат Коннектикут), *Progressive polymers, Inc.* (г. Джексонвиль, штат Техас), *RTP Co.* (г. Винона, штат Миннесота), *Shuman* (г. Шарлотт, штат Северная Каролина).

## 8.3.9 Пленки с силиконовым и алюминиевым покрытием

Осаждение оксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ) на полимерные основания упаковок используется для предотвращения проникновения паров и газов. Покрытый оксидом кремния ПЭТФ проявил прекрасные барьерные свойства, препятствующие проникновению воды и кислорода. На его барьерные свойства способны слегка воздействовать колебания температур, но, тем не менее, этот материал сохраняет свою светопрозрачность, поддается стерилизации и нагреву в микроволновой печи. Для покрытия ПЭТФ, ПЭНП, ДОПП [12] используются три способа напыления в вакууме: выпаривание, распыление, плазменное напыление. Результаты показали, что оптимальных защитных свойств для проникновения кислорода удалось добиться при использовании плазменного напыления химических веществ. Значения проницаемости для кислорода при этом гораздо ниже, чем у ПВХ. Пленки с силиконовым покрытием производятся компанией *Aicro Coating Technology* (г. Конкорд, штат Калифорния). Данные о проницаемости покрытых силиконом пленок приводятся в работе [44].

Пленки с алюминиевым покрытием ( $\text{AlO}_x$ ), изготавливаемые компаниями *Flex Products* (г. Санта Роза, штат Калифорния) и *A.D. Tech* (г. Таунтон, штат Массачусетс), составляют конкуренцию силиконовым пленкам. Пленки с таким покрытием также обладают превосходными защитными характеристиками, препятствующими проникновению газов, они прозрачны и могут подвергаться нагреву в микроволновой печи.

## 8.4 Добавки к пластмассам

Беспримесные пластмассы редко перерабатываются в готовую продукцию без добавления к ним тщательно отбираемых соединений, называемых добавками, которые вводятся в пластмассу в процессе экструзии и формовки или наносятся на формованный материал. Существует несколько причин, по которым эти соединения включаются в состав готовой продукции, а именно: улучшение условий обработки,



повышение стойкости пластмассы к окислению и обеспечение их большей ударной прочности. Кроме того, добавки служат для повышения или снижения жесткости, контроля поверхностного натяжения, упрощения экструзии и формования. Они снижают затраты, повышают устойчивость к воздействию огня и т. д. Число и количество добавок, включаемых в процесс смешивания (компаундирования) пластмассы, во многом зависит от типа пластмассы и варианта ее использования. Например, при компаундировании ПЭ единственной включаемой в состав материала добавкой может быть антиокислитель. При компаундировании ПВХ добавками являются несколько пластификаторов, наполнитель, термостабилизатор и краситель. Производителю предоставляется возможность выбора из большого количества вариантов. Обычно окончательный состав материала рассматривается как собственность, правом на которую обладает производитель.

Введение добавок осуществляется либо фирмой-изготовителем полимера, либо фирмой-производителем упаковки. Наличие добавок в упаковке постоянно приводит к возникновению вопроса о миграции этих добавок. Большинство добавок диффундируют внутри полимера и имеют тенденцию к движению по направлению к поверхности вещества. Если упакованный продукт непосредственно соприкасается с компаундированным полимером, произойдет переход добавки в продукт. Переход добавок зависит от коэффициента массообмена системы и ее термодинамики. Ниже приводится обзор некоторых добавок, вводимых в упаковки для пищевых продуктов.

### 8.4.1 Противовуалирующие добавки

При конденсации молекул воды на внутренней стороне упаковки возможно образование сплошного тонкого слоя, состоящего из маленьких капель воды. На прозрачных пленках и конструкциях такой слой капель воды является причиной преломления света в нескольких направлениях. Это явление, называемое вуалированием (потемнением), придает пленке или конструкции непрозрачный вид, что плохо не только с эстетической точки зрения — это может стать причиной повреждения упакованного продукта. Капли воды образуются в том случае, если поверхностное натяжение полимера ниже поверхностного натяжения воды. Действие добавок, препятствующих вуалированию, заключается в увеличении критического значения поверхностного натяжения полимера, при котором происходит смачивание поверхности полимера молекулами воды.

Широко распространенными добавками, препятствующими вуалированию, являются сложные эфиры жирных кислот (например, глицерин, стеарат сорбитола, жирные спирты и этилоксалаты фенолов нонила). Диапазон введения противовуалирующих добавок в пластмассы колеблется от 0,5 до 4%. На выбор и применение добавок влияют несколько различных факторов — например, тип полимера (ПЭНП, ЛПЭНП, ПВХ, ЭВА, ПП и ПЭТФ), толщина конструкции или пленки, срок службы и то, является ли данное изделие пищевым продуктом. В последнем случае для использования добавок в США необходимо разрешение *FDA*. Противовуалирующие добавки могут быть нанесены на поверхность материала или компаундированы собственнo в упаковочном материале.

### 8.4.2 Антиадгезивные добавки

Адгезия представляет собой способность двух смежных полимерных пленок приклеиваться друг к другу при простом физическом соприкосновении. Адгезия в большинстве случаев определяется степенью гладкости поверхностей. Для снижения адгезии необходимо видоизменить гладкость поверхностей за счет маленьких сыпучих частиц, поглощаемых полимером. Для снижения площади контакта в полимерные пленки, как правило, добавляются твердые частицы, называемые антиадгезивами.

Согласно исследованиям [41], для снижения адгезии в полиэтиленовые пленки стали вводить диатомитовые частицы размером от 2 до 4 мкм, однако для ЛПЭНП и ПЭНП в качестве промышленного антиадгезива широко используется тальк. Диатомит относится к классу компактных, гранулированных (сыпучих) или аморфных минералов, состоящих из гидратированного кремния. Своим происхождением диатомит обязан ископаемой водоросли (диатомее). Тальк — это мягкий минерал из мелких коллоидных частиц, мыльный на ощупь, состоящий из гидратированного силиката магния ( $4\text{SiO}_2 \cdot 3\text{MgO} \cdot \text{H}_2\text{O}$ ). Преимущество талька перед диатомитом заключается в его пластинчатой морфологии, гранулометрическом составе, а также в возможности его большей совместимости с ПЭ. Содержание его в полимерном материале колеблется в диапазоне от 0,1 до 0,5%.

При добавлении в полиэтиленовую пленку антиадгезивов происходит и воздействие на другие важные свойства полимера, к которым следует отнести, например, увеличение жесткости и получение матовой поверхности.

### 8.4.3 Бактерицидные и фунгицидные добавки

Бактерицидные добавки предохраняют полимерные материалы от воздействия микроорганизмов, то есть бактерий, а фунгицидные — от грибков или плесени.

Большинство синтетических полимеров в чистом виде не подвергаются воздействию микроорганизмов; они по большей части биологически неразложимы, однако при компаудировании внутри полимера различных низкомолекулярных добавок создаются условия для воздействия микроорганизмов.

Наличие в полимерной матрице пластификаторов, смазочных материалов или термостабилизаторов становится причиной микробиологической активности, однако следует сказать, что различные добавки обладают разной устойчивостью к биоразложению. В случае, если ожидаемое значение срока годности упаковки при хранении находится в пределах времени, необходимого для развития в ней микробиологической активности, необходимо рассмотреть возможность использования бактерицидной добавки.

Одним из наиболее компаундированных полимеров, используемых при упаковке, является ПВХ, который может содержать существенное количество пластификаторов и лубрикантов (40–50% по массе). Среди наиболее широко используемых предохраняющих добавок к полимерам следует назвать 2-*n*-октил-4 изотиазолин-3 и медь 8-квинолеат, содержание которых составляет от 0,1 до 1%. В соответствии с Федеральным законом США об инсектицидах, фунгицидах и родентицидах (FIFRA) бактерицидные добавки для полимеров считаются пестицидами.

### 8.4.4 Антиоксиданты

В процессе производства, обработки и хранения полимерные материалы химически деградируют («стареют») из-за сложных химических окислительных реакций с атмосферным кислородом. Некоторые факторы активизируют реакции окисления, и к ним можно отнести высокую температуру в процессе обработки материала, ионизирующее излучение, механическое напряжение, химическое воздействие или хранение. В процессе старения (схожего с происходящим в ходе экструзии) ковалентные связи в цепи полимера разрываются, что приводит к образованию свободных радикалов.

Старение может в значительной степени повредить полимер за счет разрыва цепи и образования поперечных связей. Как правило, изменяется средняя молекулярная масса и расширяется диапазон *MWD*. Для предотвращения повреждения полимера за счет старения в него в процессе обработки вводятся химические добавки, называемые антиокислителями.

Существует два основных типа промышленных антиокислителей (АО) — первичные и вторичные. Первичные АО действуют за счет подавления процесса окисления, и примерами могут служить замещенные фенолы (например, БОТ — бутилокситолуол) и вторичные ароматические амины.

Вторичные АО действуют за счет разложения молекулы перекиси на более стабильные продукты. Примерами вторичных АО могут служить фосфиты и серные соединения. Поскольку роль первичных и вторичных АО по механизму их воздействия разная, то для достижения оптимальных результатов, как правило, используются оба их типа.

Насыщенные полимеры (например, ПП), содержащие третичный углерод вне основной цепи, более восприимчивы к окислению, чем насыщенные линейные полимеры (например, ПЭ), содержащие в основной цепи только вторичный углерод.

В упаковочной промышленности большую часть антиокислителей употребляют для трех видов полимеров: ПП, ПЭ и УППС. Для ПП в качестве АО в большинстве случаев используется сочетание фенола и фосфита, а его общая концентрация обычно составляет от 0,08 до 1% в зависимости от состава и последующего использования. Для ПЭНП, как правило, используется БОТ. Для предотвращения миграции добавок из пластмасс используют менее летучие добавки. Так, для ПЭВП и ЛПЭНП используются АО, менее летучие, чем БОТ.

Полифенолы более высокой концентрации обычно используются в сочетании с фосфитами. Для ПС замещенные фенолы используются в сочетании с поглотителями ультрафиолета. Использование в качестве АО для полиолефинов  $\alpha$ -токоферола или витамина Е рассмотрено в работе [29].

В случае ПВХ старение чаще всего происходит по ионному механизму — за счет дегидрохлорирования. Реакция автокатализируется побочным продуктом HCl и впоследствии ускоряется кислородом. Наиболее широко используемыми стабилизаторами ПВХ являются металлоорганические соединения и соли свинца, кадмия, бария, цинка и олова, а также эпоксиды и фосфиты.

### 8.4.5 Антистатика

Как правило, статическое электричество вырабатывается на поверхности полимера за счет трения о другую поверхность или воздух. Накоплению статического электричества благоприятствует низкая электропроводность полимеров. При упаковке быстро перемещающаяся пленка (будь то в ходе непрерывного процесса упаковки или на линии герметизации) способствует образованию на ней статического электричества.

Статическое электричество может неблагоприятно воздействовать на технологический процесс за счет появления неконтролируемых электрических сил, в результате чего может произойти загиб или налипание поверхностей. Кроме того, наличие статического электричества способно создать опасные условия — например, образование искр, следствием чего может стать взрыв паров. Для большинства полимеров электрические заряды накапливаются на поверхности, поскольку полимеры обладают высоким удельным сопротивлением, что дает поверхности возможность проводить электроны и ионы.

Электростатика поверхности полимера зависит от наличия антистатических добавок, которые делают поверхность более электропроводной или уменьшают ее удельное электрическое сопротивление. Например, вода в гидрофильном полимере (например, полиамиде), который находится в равновесии с воздухом при 65% относительной влажности, будет действовать в качестве антистатической добавки и препятствовать накоплению статического электричества. При низких значениях относительной влажности подобное действие остается незаметным. Поскольку большая часть полимеров, используемых в процессе упаковки, не являются гидрофильными, для контроля статического электричества необходимо использовать антистатические добавки. Этими добавками, как правило, выступают катионоактивные, ионные и неионные поверхностно-активные вещества (ПАВ). Широко используемой группой катионоактивных антистатических добавок являются алкильные соли аммония, которые, как правило, используются в полярных основаниях (ПВХ) и стирольных полимерах. Другие группы включают в себя алкильные производные фосфора и серы. В состав эластичного ПВХ может входить до 7% таких антистатических добавок, использование которых не разрешено FDA. Сульфонаты алькильнокислого натрия, схожие с обычным моющим средством, получили широкое распространение в качестве анионной антистатической добавки, которые также используются в ПВХ и стирольных полимерах. К другим анионным антистатическим добавкам можно отнести алкилфосфорную и дитиокарбаминовую кислоты.

Для неполярных полиолефинов, как правило, используются неионные антистатические добавки, которые включают в себя этоксилированные жирные амины, сложные эфиры жирных кислот, амиды этанола и гликолевые эфиры ПЭ. Дозировки для ПЭНП составляют до 0,05%. Антистатические добавки могут быть добавлены как внутрь полимера, так и нанесены снаружи. Внутренние антистатики смешиваются с пластмассой и действуют в процессе миграции на поверхность полимера. Внешние антистатики наносятся непосредственно на поверхность полимера посредством распыления или при погружении полимера в раствор антистатической добавки.

## 8.4.6 Красители

Использование в пластмассе красителей объясняется исключительно желанием придать продукту внешний вид, привлекательный для потребителя. Красители не повышают механической прочности изделия и не улучшают его защитных характеристик. Они способны придать упаковке непрозрачность, которая может способствовать защите упакованного продукта от воздействия света. Выбор, сочетание и согласование цветов представляют собой сложную задачу, правильно решить которую в состоянии только хорошо обученный персонал. При производстве пластмассы используются сотни различных красителей. Многообразие применяемых красителей соответствует разнообразным типам производимых пластмасс.

В настоящее время при производстве пластмасс отказываются от использования токсичных красителей, особенно тех, основой которых являются тяжелые металлы (хром, кадмий и свинец). Подобно измерению оптических свойств бумаги и картона, составление спецификаций цвета, используемого для пластмасс, основывается на измерении оттенка, яркости и непрозрачности. Другими важными показателями, которые необходимо иметь в виду, являются способность к рассеиванию в пластмассе, миграция, токсичность, световая стабильность и сопротивляемость химическому воздействию.

В мире набирает силу движение за отказ от использования красителей, основой которых являются тяжелые металлы. Европейский Союз рассматривал возможность их запрещения в 1995 г. В 1993 г. в США насчитывалось 22 штата, в которых было ограничено или запрещено использование красителей, в состав которых входят тяжелые металлы. В настоящее время наблюдается тенденция использования органических красителей или красителей, свободных от тяжелых металлов. Вводимые в пластиковую тару красители находятся в непосредственном контакте с пищевыми продуктами, и их использование должно быть одобрено FDA.

Существует несколько важных типов красителей, используемых в пластмассах [11]. Они будут рассмотрены ниже.

### 8.4.6.1 Окрашивающие вещества

Окрашивающие вещества — это красители, которые растворимы в пластмассе. Как правило, такие вещества являются органическими соединениями, обладающими низкой молекулярной массой. Они придают пластмассе хорошую светопрозрачность (прозрачность), но легко мигрируют из нее. Именно склонность к миграции — причина ограниченного использования окрашивающих веществ при изготовлении пластмасс. Некоторые из них чрезвычайно токсичны, и их применение регулируется Американской Профессиональной Ассоциацией по безопасности и охране здоровья (OSHA). К окрашивающим веществам относятся азо-, диазо- и пиразалоны, антраквиноны, квинифталоньи и квинолины.

### 8.4.6.2 Органические пигменты

Органические пигменты, в отличие от окрашивающих веществ, нерастворимы в матрице пластмассы. Они изготавливаются в форме очень мелких частиц, которые придают пластмассе непрозрачный вид. Склонность органических пигментов к мигра-

ции ниже, чем у окрашивающих веществ, но некоторые из них также очень токсичны. При работе с этими пигментами, необходимо следовать правилам, установленным OSHA. Примерами органических пигментов могут служить следующие:

- бензимидазоны (желтый, красный, оранжевый);
- фталоцианины (синий, зеленый);
- хинакридины (фиолетовый, красный, оранжевый);
- диоксазины (фиолетовый);
- дисазокрасители (желтый, красный);
- пиразалоны (оранжевый, красный).

#### 8.4.6.3 Неорганические пигменты

Широко используемые при изготовлении пластмасс неорганические пигменты не обладают ни яркостью, ни интенсивностью цвета, который характерен для органических пигментов, однако они дешевле, прозрачнее и более стабильны в условиях высоких температур. Поскольку они с трудом растворимы в полимерах, их склонность к миграции меньше, чем у органических пигментов. Многие из неорганических пигментов чрезвычайно токсичны, поскольку они представляют собой оксиды тяжелых металлов (например, хрома, свинца и никеля). При работе с этими красителями необходимо придерживаться положений OSHA. Примерами неорганических пигментов могут служить следующие вещества:

- оксид титана (белый);
- хроматы свинца (желтый, оранжевый);
- хромат цинка (желтый);
- титанат никеля (желтый);
- титанат хрома (желтый);
- оксид хрома (зеленый);
- оксиды железа (коричневый, красный, желтый, черный);
- сульфоселениды кадмия (темно-бордовый, красный, оранжевый);
- алюмат кобальта (синий);
- молибдат свинца (оранжевый);
- сульфид кадмия (оранжевый);
- хромит железа (черный, отражающий инфракрасный свет).

#### 8.4.6.4 Красочные лаки (краплак)

Красочные лаки состоят из красителя, связанного с неорганическим основанием, — например, гидратом окиси алюминия. В индустрии упаковки эти красители используются для усиления различных визуальных эффектов.

#### 8.4.6.5 Красители с перламутровым оттенком

Эти красители придают упаковке особый перламутровый блеск и обеспечивают радужный эффект. Наиболее часто используемыми красителями с перламутровым эффектом являются сланцы, покрытые оксидом титана, и сланцы, покрытые окси-

дом железа. Они образуют тонкие пленки с высоким коэффициентом преломления, которые как отражают, так и пропускают падающий свет.

#### 8.4.6.6 Красители и FDA

Использование красителей при производстве пластмасс наряду с экономическими факторами требует учета вопросов, связанных с безопасностью и здоровьем. Как уже говорилось в разделе 8.1.3, FDA опубликовало список разрешенных красителей. Красители для полимеров рассматриваются в разделе 21 CFR 178.3297. Перечисленные там красители «могут быть безопасно применены в качестве красителей при производстве изделий или их компонентов, предназначенных для использования при производстве, упаковывании, обработке, подготовке, очистке, фасовании, транспортировке и хранении пищевых продуктов». В этом документе присутствуют также и некоторые положения, относящиеся к определению красителя, его миграции в пищевые продукты, а также ссылки на раздел 409 Федерального закона США о пищевых продуктах, лекарственных препаратах и косметических средствах, которые необходимо принимать во внимание при рассмотрении соответствующего вопроса.

К неорганическим красителям, перечисленным в 21 CFR 178.3297, относятся алюминий, гидрат алюминия, силикат алюминия и калия, сульфат бария, бетонит, карбонат кальция, силикат кальция, сульфат кальция, газовая сажа (получаемая в процесс обработки очищенного природного газа), окись хрома зеленая ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), алюминат кобальта (с ограничениями), диатомиты и оксиды железа (измененные каолином для использования в олефиновых полимерах до 40%). Кроме того, сюда можно отнести оксид магния, силикат магния (тальк), сиенну, диоксид кремния, двуокись титана, двуокись титана–сульфат бария, ультрамарин, карбонат цинка (имеет ограничения в использовании), хлорат цинка (менее 10%), оксид цинка (использование ограничено) и сульфид цинка (менее 10%).

Частичное перечисление органических красителей из 21 CFR § 178.3297 включает все цвета, сертифицированные FD&C, то есть *C. I Pigment Blue 15*, *C. I Pigment Violet 19*, *C. I Pigment Red 38*, *C. I Pigment Orange 64*, *C. I Pigment Yellow 95*, *C. I Pigment Yellow 138* и *C. I Pigment Red 177*. За последние годы FDA санкционировало использование несколько новых красителей для упаковок пищевых продуктов и расширило использование остальных. Некоторые из них обладают ограниченной термической стабильностью, что, вероятно, делает их непригодными для использования с такими полимерами, как нейлон и поликарбонат [28]. Окончательное решение о применении красителей и других добавок, контактирующих с пищевыми продуктами, следует принимать в соответствии с положениями FDA.

### 8.4.7 Термостабилизаторы

Основным недостатком ПВХ является его недостаточная термостабильность (жаростойкость). При отсутствии соответствующих добавок изготовленные из ПВХ изделия (например, пленки или бутылки) в случае нагрева их при умеренно высоких температурах, стерилизации посредством гамма-лучей, воздействия на них ультрафиолетового излучения портятся.



Соединения, называемые термостабилизаторами, способны эффективно снизить скорость процесса деградации, который постепенно делает цвет материала желтым, янтарным, красновато-коричневым и, в конце концов, черным. Наилучшим способом управления процессом деградации ПВХ является тщательный отбор соответствующего термостабилизатора для конкретного варианта применения ПВХ. Термостабилизаторы представляют собой неорганические, металлоорганические и органические соединения. Более 90% термостабилизаторов, используемых в США, представляют собой бариево-кадмиевые, свинецорганические и оловоорганические соединения. Одним из наиболее распространенных оловоорганических стабилизаторов является дибутилоловооксид.

Добавки, используемые в бутылках из ПВХ для растительного масла и других пищевых продуктов (например, дибутилоловооксид, кальциево-цинковые соединения или оловометил), должны быть сертифицированы *FDA*. Для тех материалов, из которых изготавливаются эластичные упаковки, наиболее распространенными стабилизаторами являются смешанные металлы, например, барий-цинк и кальций-цинк. Для жесткой тары, изготавливаемой методом выдувного формования и каландрирования листов, наиболее часто используемые стабилизаторы — оловоорганические соединения.

## 8.4.8 Пластификаторы

Пластификаторы — это вещества, вводимые в полимеры в целях придания эластичности и пластичности в условиях переработки и эксплуатации. За счет снижения температуры стеклования и связывающей способности цепи пластификаторы улучшают рабочие и экструзионные характеристики, снижают минимальную температуру обработки, уменьшают жесткость пластмассы и повышают эластичность материала при низких температурах.

Использование пластификаторов необходимо не для всех пластмасс. Однако для некоторых из них, например ПВХ, использование соответствующего пластификатора имеет существенное значение. Использование ПВХ зависит от уровня пластификатора.

Без пластификаторов ПВХ представляет собой полукристаллический хрупкий полимер, с трудом поддающийся обработке. При низких уровнях концентрации пластификатор способствует снижению температуры обработки материала. Это препятствует термическому разрушению полимера.

При более высоких уровнях концентрации, наряду с улучшениями условий обработки, пластификатор уменьшает жесткость и увеличивает эластичность конечного продукта. ПВХ представляет собой полимер, хорошо приспособленный для пластификации. На него приходится более 80% общего количества производимого пластификатора. Чтобы пластификатор мог оказывать необходимое действие, в нем должны быть правильно сбалансированы различные функциональные группы, что позволяет ему быть полностью совместимым с полимером. Как правило, пластификаторы имеют слишком сильную функциональную полярность для совместимости с полярными и неполярными группами полимера. Различные соотношения полярных/неполярных групп делают каждый пластификатор пригодным



для какого-то одного из вариантов применения. Для улучшения условий обработки при высоких температурах предпочтительно использование более полярного пластификатора, например, дибутилфталата. Для улучшения способности материала к обработке при низких температурах, то есть для увеличения эластичности ПВХ за счет понижения температуры стеклования следует использовать неполярный полимер.

Широко используемыми пластификаторами являются фталаты, а среди них наибольшее распространение получил фталат диэтилгексила (*DOP*). Несмотря на то что меры безопасности при использовании *DOP* в 1980-х гг. были ужесточены, относительно его применения до сих пор нет окончательной ясности. До настоящего времени не было принято никаких мер по урегулированию производства и применения *DOP*, и как в США, так и в Европе он переживает свое второе рождение.

### 8.4.9 Стабилизаторы ультрафиолетового излучения

Внешнее ультрафиолетовое излучение или гамма-излучение, используемое для стерилизации медицинских и биологических препаратов, может вызвать фотоокисление в ПС и полиолефинах (в особенности ПП), ПВХ и других полимерах. Будучи чрезвычайно активными, фотоны ультрафиолета легко улавливаются полимерной цепью, результатом чего становится разрыв ковалентных связей и образование свободных радикалов. Несмотря на то, что из-за разной чувствительности реакция частиц каждого из полимеров на ультрафиолетовое излучение различна, общее его воздействие может быть разрушительным для полимера.

К некоторым отрицательным результатам фотоокисления можно отнести изменение цвета, потерю эластичности и гляцевитости и деградацию полимера (похожее воздействие ультрафиолетовое излучение оказывает на кожу человека). Для защиты полимеров от разрушительного воздействия ультрафиолетового излучения используются различные методы.

Одним из них является использование «экранирующих» защитных добавок, которые поглощают вредное ультрафиолетовое излучение и испускают излучение, обладающее большей длиной волны и меньшей энергией. Примером такой добавки может служить гидробензофенон, используемый с ПВХ, ПЭ, ПП, целлюлозой и ПЭТ. Также нашло свое применение и семейство *Triuvin P*, основанное на бензотриазолах, хотя действие этих добавок в полиолефинах не столь эффективно, как действие гидробензофенона. В 1995 г. в работе [38] было описано уменьшение процесса окисления соевого масла при условии введения в упаковочный материал поглотителя ультрафиолетового излучения *Triuvin 326*.

Другая группа стабилизаторов действует за счет «гашения» той части полимерной цепи, которая оказалась «возбуждена» за счет энергии фотона ультрафиолета. В качестве примера такого стабилизатора можно привести органическую соль никеля, используемую в ПП и ПЭ.

Еще одним и последним вариантом может стать поглощение стабилизатором свободных радикалов. К таким веществам относится группа эффективных амина-

вых стабилизаторов (*HALS*). В отличие от фенольных и фосфитных антиокислителей *HALS* обеспечивают процесс стабилизации поглощенных радикалов. Диапазон применения *HALS* включает в себя область применения окрашенных полимеров и стабилизаторы излучения в ПП, используемом для продуктов биологического происхождения. Вызывает беспокойство поглощение гамма-излучения при использовании окиси этилена в процессе стерилизации медицинских материалов. Стабилизаторы ультрафиолетового излучения должны защищать используемые в этом процессе полимерные материалы. Сегодня *HALS* превратились в очень важные стабилизаторы ультрафиолетового излучения. На рынке имеется множество *HALS*-соединений, и их правильный выбор должен зависеть от типа полимера и его назначения. Результатом сочетания различных стабилизаторов становится возникновение синергетического эффекта, что обеспечивает превосходную защиту полимера.

Газовая сажа представляет собой дешевый материал, который обеспечивает защиту полимеров от ультрафиолетового излучения даже при ее низкой концентрации. Сажа может быть использована в ПВХ, ПЭ и ПП.

#### 8.4.10 Другие добавки

В полимеры могут быть введены и другие добавки, хотя они имеют не слишком большое значение для упаковки. К этим добавкам можно отнести вещества, ингибирующие горение, наполнители, связующие вещества и добавки, упрощающие обработку. Для формирования пластиковой пены используются также и нагнетающие вещества, которые не являются добавками в полном смысле этого слова. Нагнетающие вещества делятся на химические и физические. Химические нагнетающие вещества действуют за счет разложения соединений, необходимых для образования нагнетательного газа. Принцип действия физических веществ основан на подаче сжатых газов. В недавнем прошлом в качестве физических веществ широко использовались фторуглероды, однако их применение было прекращено ввиду проблем с озоновым слоем. Экспандированный ПС производится с использованием пентана и не содержит нагнетающей добавки. В настоящий момент пены экспандированных ПЭТ, ПП и ПВХ изготавливаются с использованием эндотермического CBS, который образует меньшее количество выделяющихся газов. Как мы отмечали в разделе 8.2.3, любая добавка, используемая при производстве упаковок, контактирующих с пищевыми продуктами, должна соответствовать положениям *FDA*.

### 8.5 Массообмен в упаковочных системах

Массообмен в упаковочных системах зависит от выбора упаковочных материалов и физической целостности упаковки. Массообмен сквозь упаковку может происходить в следующих случаях:

1. Неоднородность упаковки, например, микроотверстия и трещины в стенках упаковки и на загерметизированных участках, а также в крышках (см. раздел 8.5.1).

2. Проникание сквозь стенку упаковки (см. раздел 8.5.2);
3. Барьерное равновесие (о барьерных свойствах см. выше).

### 8.5.1 Массообмен сквозь микроотверстия

Микроскопические отверстия и трещины не только дают возможность осуществления массообмена между внутренней стороной упаковки и внешней средой, но могут стать и причиной проникновения микроорганизмов внутрь упаковки. Некоторые бактерии способны проникнуть сквозь отверстия, диаметр которых составляет 0,4 мкм [3]. Моделирование потока, проходящего сквозь отверстия в упаковке, уместно при тестировании целостности упаковки или же при использовании перфорированных пленок.

Испытания, не разрушающие сохранности упаковки, как правило, основываются на обнаружении места утечки газа сквозь упаковочный материал. Изменение давления между упаковкой и окружающей средой может быть обнаружено посредством использования различных методов [14]. Неразрушающие методы тестирования могут быть разделены на следующие категории: визуальные, оптические, акустические; методы, обнаруживающие разницу давления, и некоторые другие. Газообмен сквозь микроскопические отверстия в регулируемой газовой среде увеличивает скорость передачи таких газов, как  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$ .

Нарушение целостности упаковки может проявляться в бутылках между их горлышком и пробкой. Для гарантии достаточной герметизации необходимо использовать прокладки и обеспечивать достаточный вращающий момент пробки.

#### 8.5.1.1 Диффузия сквозь микроскопическое отверстие в защитной мембране

Защитная мембрана может представлять собой эластичный материал, жесткую стенку тары или же уплотнение, осуществленное за счет термосклеивания или склеивания. Молекулярный перенос сквозь микроскопическое отверстие (пору) включает в себя диффузию, объясняющуюся разницей концентраций (диффузия Кнудсена), и гидродинамический поток, который становится результатом разницы давлений. Рассмотрим цилиндрическое капиллярное отверстие с диаметром  $d$  и длиной  $l$ , равной толщине стенки упаковки. Стенка разделяет две смеси газа — внутри упаковки и окружающую среду. Предположим, что внутреннее давление равно  $p_i$ , а внешнее —  $p_o$ . Если радиус отверстия меньше среднего пути  $\lambda$  свободного пробега молекулы диффундирующего газа, то конкретная молекула будет чаще соударяться со стенками поры, чем с другими молекулами (см. пример 8.2). Значение  $d/\lambda$  может быть менее 0,2, больше 20, или же находиться между этими значениями. Если  $d/\lambda < 0,2$ , то скорость диффузии регулируется за счет соударений молекул газа со стенками отверстия и подчиняется закону Кнудсена [50].

#### 8.5.1.2 Диффузия Кнудсена

Поток газа  $A$  вследствие диффузии Кнудсена выражается следующим уравнением [54]:

$$N_A = -D_{KA} \frac{dc_A}{dx}, \quad (8.1)$$

где  $N_A$  — поток молекул  $A$ , моль/(м<sup>2</sup> · с);  $D_{KA}$  — коэффициент диффузии Кнудсена молекул  $A$ , м<sup>2</sup>/с;  $C_A$  является концентрацией  $A$ , моль/л;  $x$  — диаметр отверстия, м.

Исходя из кинетической теории газа,  $D_{KA}$  выражается следующей формулой:

$$D_{KA} = \frac{d}{3} \overline{V_A}, \quad (8.2)$$

где  $\overline{V_A}$  — средняя скорость молекул в м/с, выражаемой следующим образом:

$$\overline{V_A} = \left( \frac{8}{\pi} \frac{RT}{M} \right)^{1/2}, \quad (8.3)$$

где  $R$  — газовая постоянная, равная 8314 Н · м/кг · моль · К;  $T$  — температура, К;  $M_A$  — масса одного моля газа, кг/моль.

### Пример 8.1

Необходимо рассчитать скорость молекулы  $\text{CO}_2$  в процессе диффузии Кнудсена при температуре 0 °С.

*Решение*

Исходя из уравнения (8.3) и зная, что  $M = 44$  кг/моль,

$$\overline{V_{\text{CO}_2}} = \left( \frac{8}{\pi} \frac{8,614 \cdot 273,15}{44} \right)^{1/2} = 362,5 \text{ м/с.}$$

Из уравнения 8.3 имеем:

$$\frac{\overline{V_A}}{\overline{V_B}} = \left( \frac{M_B}{M_A} \right)^{1/2} \quad (8.4)$$

и

$$\frac{\overline{V_1}}{\overline{V_2}} = \left( \frac{T_1}{T_2} \right)^{1/2}. \quad (8.5)$$

Из уравнения (8.4) видно, что более легкая молекула будет иметь большую скорость, чем тяжелая, а значит и ее передача будет осуществляться быстрее. Значения  $\overline{V_A}$  для некоторых газов представлены в табл. 8.16.

Таблица 8.16. Значения  $\overline{V_A}$  для некоторых газов

Газ	Молекулярная масса	Значения $\overline{V_A}$ при определенной температуре, °С		
		0	15	25
O <sub>2</sub>	32	425,1	436,6	444
N <sub>2</sub>	28	454,5	466,8	474,8
He	4	1202,0	1256	1256,2
CO <sub>2</sub>	44	362,5	372,4	378,8
H <sub>2</sub> O	18	566,8	582,1	592,1
Воздух	28,8	460,2	460,2	468,1

Примечание. Значения приводятся в м/с.

В устойчивом состоянии течение Кнудсена  $N$  (в моль/м<sup>2</sup>·с) сквозь отверстие площадью  $A$  может быть рассчитано за счет интегрирования уравнения (8.1)

$$N = A \frac{D_{KA}}{RlT} (p_i - p_o) \quad (8.6)$$

или

$$J = 706 \, d^3 \bar{V}_A (p_i - p_o) / lT, \quad (8.7)$$

где  $J$  — поток газа сквозь отверстие, мл (STP)/с;  $d$  — диаметр отверстия, м;  $\bar{V}_A$  — скорость молекулы из уравнения (8.3) (или табл. 8.16), м/с;  $T$  — температура, К;  $l$  — толщина стенки упаковки, м;  $p_i$  и  $p_o$  — соответственно давления внутри и снаружи, Па. Условия STP (стандартные) соответствуют 0 °С и одной стандартной атмосфере.

### 8.5.1.2.1 Средняя длина свободного пробега

Течение Кнудсена происходит в отверстии в том случае, если диаметр отверстия  $d$  меньше одной пятой средней длины свободного пробега молекулы  $\lambda$ . Свободный ход молекулы может быть рассчитан исходя из следующей формулы [9]:

$$\lambda = \frac{k_B T}{(\pi \sqrt{2} \sigma^2 p)}, \quad (8.8)$$

где  $K_B$  — постоянная Больцмана, равная  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;  $\sigma^2$  — диаметр проникновения диффундирующей молекулы.

Из уравнения 8.8 следует, что средняя длина свободного пробега увеличивается вместе с температурой и снижается вместе с давлением газа. Для большинства упаковок  $T = 25 \text{ °С} = 298,7 \text{ К}$ , а давление составляет одну атмосферу или даже менее.

#### Пример 8.2

Рассчитать  $\lambda$  для  $O_2$  при 25 °С и  $p = 0,2$  атм.

*Решение:*

Из уравнения (8.8) следует:

$$\sigma = 2,98 \cdot 10^{-10} \text{ м [8]},$$

$$p = 0,2 \cdot 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па},$$

$$\lambda = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293,15}{\pi \sqrt{2} \cdot (2,98 \cdot 10^{-10} \cdot 0,2 \cdot 1,013 \cdot 10^5)} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

Другие значения  $\lambda$  представлены в табл. 8.17.

Течение Кнудсена, проходящее сквозь отверстие в упаковке, может быть рассчитано за счет использования уравнения (8.7).

#### Пример 8.3

Рассчитать течение Кнудсена для  $O_2$  по всему отверстию в упаковке, диаметр которого составляет  $0,1 \cdot 10^{-6}$ , а толщина стенки  $100 \cdot 10^{-6}$ . При этом предполагается, что  $p_i - p_o$  составляет 0,2 атм ( $2,0265 \cdot 10^4$  Па) при 25 °С.

Таблица 8.17. Среднее расстояние свободного пробега молекулы для некоторых газов при температуре 25 °С и диаметре отверстия для течения Кнудсена

Газ	$\sigma \times 10^{10}$ м	Давление, атм	$\lambda$ , мкм	$d = 0,2\lambda$ , мкм
CO <sub>2</sub>	3,34	0,2	0,4	0,08
O <sub>2</sub>	2,98	0,2	0,5	0,1
N <sub>2</sub>	3,15	0,8	0,1	0,02
He	1,9	0,01	24,9	5,0

Решение:

Используем уравнение (8.7) для  $d = 0,1 \cdot 10^{-6}$  м,  $(p_i - p_o) = 2,0265 \cdot 10^4$  Па;  $T = 298,15$  К;  $l = 10^{-4}$  м. Значение  $\bar{V}$  берем из табл. 8.16.

$$J = 706 \cdot (1 \cdot 10^{-7})^3 \cdot 444 \cdot 2,0265 \cdot 10^4 / (298,15 \cdot 1 \cdot 10^{-4});$$

$$J = 2,1 \cdot 10^{-10} \text{ мл (STP)/с для каждого отверстия.}$$

Общий объем газа, переносимый сквозь 1000 отверстий на протяжении 100 дней, будет равен:

$$V = 2,1 \cdot 10^{-10} \cdot 1000 \cdot 100 \cdot 86\,400 = 1,8 \text{ мл O}_2 \text{ в STP.}$$

### Пример 8.4

Рассчитать для гелия течение Кнудсена сквозь 100 отверстий диаметром  $5 \cdot 10^{-6}$  в упаковке, толщина которой составляет 100 мкм, если  $p_i - p_o = 0,01$  атм ( $10,13 \cdot 10^3$  Па) и при температуре, равной 25 °С.

Решение:

Используем уравнение (8.7) для  $d = 5 \cdot 10^{-6}$  м,  $(p_i - p_o) = 1,013 \cdot 10^3$  Па;  $T = 298,15$  К;  $l = 10^{-4}$  м. Значение берем из табл. 8.19.

$$J = 706 \cdot (5 \cdot 10^{-6})^3 \cdot 1256 \cdot 1,013 \cdot 10^3 / (298,15 \cdot 1 \cdot 10^{-4});$$

$$J = 3,8 \cdot 10^{-4} \text{ мл (STP)/с для каждой поры.}$$

Этот тип потока может иметь значение при использовании методов определения утечки.

### 8.5.1.3 Поток в промежуточной поре

При значении  $d/\lambda$ , находящемся в диапазоне от 0,2 до 20, в отверстии имеет место поток, обусловленный как молекулярной диффузией, так и диффузией Кнудсена. Этот поток выражается следующим уравнением:

$$N_A = \frac{N_A}{N_A + N_B} \frac{D_{AB,eff} p_t}{RT} \ln \frac{\frac{N_A}{N_A + N_B} \left( 1 + \frac{D_{AB,eff}}{D_{K,A,eff}} \right) - y_{A,o}}{\frac{N_A}{N_A + N_B} \left( 1 + \frac{D_{AB,eff}}{D_{K,A,eff}} \right) - y_{A,i}}, \quad (8.9)$$

где  $A$  и  $B$  — диффундирующие молекулы;  $N_A$  и  $N_B$  — число частиц  $A$  и  $B$ , диффундирующих через единицу площади;  $D_{AB}$  — молекулярный коэффициент диффузии  $A$

сквозь  $B$ ;  $D_{AB,eff}$  — коэффициент эффективной диффузии, отражающий воздействие структуры отверстия (поры);  $D_{K,A}$  — коэффициент диффузии Кнудсена молекул  $A$ ;  $D_{K,A,eff}$  — коэффициент эффективной диффузии Кнудсена молекул  $A$ .

Из уравнения (8.9) следует, что поток не зависит от диаметра отверстия  $d$ .

Коэффициент эффективной диффузии представляет собой единицу измерения асимметричного прохождения сквозь отверстия. Для пористого материала это значение, как правило, неизвестно. Однако при рассмотрении упаковочного материала можно предположить, что длина прокола равна толщине стенки упаковки, то есть асимметричное прохождение отсутствует. В этом случае, молекулярный коэффициент диффузии  $D_{AB}$  и действительный коэффициент диффузии  $D_{AB,eff}$  могут считаться одинаковыми.

#### 8.5.1.4 Прохождение потока сквозь большие отверстия

Если соотношение  $d/\lambda$  больше 20, то преобладает обычная молекулярная диффузия, а уравнение, выражающее устойчивый поток, будет выглядеть следующим образом [50,54]:

$$N_A = \frac{N_A}{N_A + N_B} \frac{D_{AB,eff} p_t}{RlT} \ln \frac{N_A/(N_A + N_B) - y_{Ao}}{N_A/(N_A + N_B) - y_{Ai}}, \quad (8.10)$$

где  $y_A = p_A/p_t$  — мольная доля;  $p_A$  — парциальное давление  $A$ ;  $p_t$  — общее давление; индексы  $o$  и  $i$  обозначают внешнюю и внутреннюю стороны упаковки соответственно.

Кроме того,

$$D_{AB} = \frac{T^{3/2}}{p}. \quad (8.11)$$

Для двойных смесей получается [50], что

$$\frac{N_A}{N_B} = - \left( \frac{M_A}{M_B} \right)^{1/2}, \quad (8.12)$$

где  $M$  — молекулярный вес.

#### 8.5.1.5 Гидродинамический поток газа (поток Пуазейля)

Если в пористом твердом теле имеется перепад суммарного давления, вызванный, например, вакуумным насосом, то в результате образуется гидродинамический поток сквозь прямой капилляр. Для газа, подчиняющегося закону идеального газа и для относительно невысоких скоростей (число  $Re < 2100$ ), этот поток может быть описан с использованием закона Пуазейля [50]:

$$J = \frac{\pi d^4 (p_i - p_2)}{128 \mu l}, \quad (8.13)$$

где  $J$  — поток, проходящий сквозь отверстие ( $\text{м}^3/\text{с}$ );  $d$  — диаметр отверстия ( $d/\lambda > 20$ ,  $\text{м}^2$ );  $p_1 - p_2$  — перепад давления ( $\text{Па}$ );  $\mu$  — плотность газа в  $\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ ;  $l$  — длина капилляра, равная толщине стенки упаковки.

### Пример 8.5 (поток Пуазейля)

Предположим, что упаковка с мясом, где состав свободного пространства, оставленный между продуктом и упаковочным материалом, 80%  $\text{N}_2$  и 20%  $\text{CO}_2$  при помощи неразрушающего теста в вакууме проверяется на герметичность [22].

Предположим, что испытание продолжается на протяжении 24 с и направлено на получение максимального уровня утечки  $\text{CO}_2$ , равного 300 частей на миллион (*ppt*) в вакуумной камере объемом  $0,013 \text{ м}^3$ . Толщина упаковки 62 мкм. Давление внутри упаковки  $p_1$  равно 1 атм, а внешнее разрежение — 0,6 атм. Температура тестирования составляет  $25^\circ\text{C}$ . Необходимо рассчитать примерный размер отверстия, через которое возможна такого рода утечка.

Решение:

Вязкость смеси  $\mu = (0,8 \cdot 0,180 + 0,2 \cdot 0,15) \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$  [37]. При помощи этих значений возможен расчет  $J$ .

$$J = \frac{0,013 \cdot 300 \cdot 10^{-6}}{24 \cdot 0,2} = 8,125 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Если  $\mu = 0,174 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$ , а  $p_1 - p_2 = 0,4 \cdot 1,01325 \text{ Па}$ , то значение  $d$  по уравнению (8.13) будет равно

$$d = \left[ \frac{128\mu J}{\pi(p_1 - p_2)} \right]^{1/4} = \left[ \frac{128 \cdot 0,174 \cdot 10^{-4} \cdot 62 \cdot 10^{-6} \cdot 8,125 \cdot 10^{-7}}{\pi \cdot 0,4 \cdot 1,01325 \cdot 10^5} \right]^{1/4};$$

$$d = 30,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

#### 8.5.1.5.1 Определение утечки

Достаточно достоверную информацию о целостности упаковки может дать оборудование для испытания по определению утечек, основывающееся на измерении незначительных следов газа. Расчет размера абсолютного прокола менее точен, поскольку некоторые условия неизвестны. Эти условия включают в себя фактическую геометрию утечки, и, что более важно, количество точек, в которых последняя происходит. На результат влияют и другие факторы, имеющие отношение к испытательному прибору (например, чувствительность и процедура отбора изделий для контроля). Если в упаковке имеется более одного прокола, то уравнение (8.12) может быть представлено следующим образом:

$$J = \frac{\pi(p_1 - p_2)}{128\mu l} \sum_i^n d_i^4, \quad (8.14)$$

где  $n$  — количество проколов;  $d_i$  — средний диаметр каждого прокола.

Однако единичный прокол, поток к которому эквивалентен потоку к  $n$  отверстиям, будет иметь диаметр, выражаемый следующим образом:

$$d^4 = \sum_i^n d_i^4.$$



Если принять, что все отверстия одного размера, то

$$d_e = \frac{d}{n^{1/4}}, \quad (8.15)$$

где  $d_e$  — диаметр прокола, эквивалентный  $n$  отверстиям.

Из уравнения (8.14) следует, что поток  $J$  в примере 8.5 мог быть, например, создан также и ста отверстиями диаметром в 9,5 мкм.

## 8.5.2 Проницаемость

Понятие проницаемости, как правило, связывается с количественной оценкой барьерных свойств материала. Материал, представляющий собой хорошую защиту, имеет низкое значение проницаемости.

Полимеры в отличие от металлов, стекла и керамики — проницаемые материалы. Явление проницаемости наблюдается в тот момент, когда стенка полимера разделяет две жидких фазы, которые содержат в себе группы низкого молекулярного веса, обладающие разными значениями активности в каждой из фаз. Молекулы, находящиеся на стороне высокой концентрации или активности, склонны диффундировать сквозь структуру полимера, и достигать другой стороны для возможного уравнивания концентрации обеих фаз.

### 8.5.2.1 Защитный материал

Защитная характеристика пластиковой конструкции представляет собой физическое сопротивление, которое она проявляет к прохождению любой молекулы или соединения, способных диффундировать сквозь полимер. Сюда можно отнести кислород, углекислый газ, воду и запахи, поступающие из воздуха или из свободного пространства, оставляемого над продуктом в таре. Кроме того, под эту категорию попадают также и привкусы, ароматы, компоненты пищевых продуктов, внешние соединения, содержащиеся либо во вторичной упаковке (например, гофрированные коробки), либо в компонентах упаковки (ванилин), или остатках растворителей. При разработке упаковки очень важно иметь представление о ее защитных («барьерных») свойствах. Оптимальный дизайн упаковки становится результатом сбалансированности характеристик того материала, из которого она изготовлена, требований, предъявляемых к защите продукта, внешних условий и условий перевозки, а также стоимости. Защитные свойства полимерного материала в основном зависят от его химической структуры. Структура полимера может быть полярной и неполярной, а полярный полимер может быть гидрофильным или нет. Полярные гидрофильные полимеры в сухом состоянии представляют собой хорошую защиту от проникновения газов и органических паров, но во влажном состоянии они плохо задерживают газы (например, ПВХ и нейлоны). Барьерные же характеристики негидрофильных полимеров, содержащих группы нитрила, хлора или фтора, наоборот, не зависят от наличия молекул воды. Аналогично, на неполярные полимеры, например, полиолефины не оказывает воздействие наличие воды, но они не обладают столь же хорошими защитными свойствами как полярные полимеры, за исключением защиты от самой полярной молекулы воды.

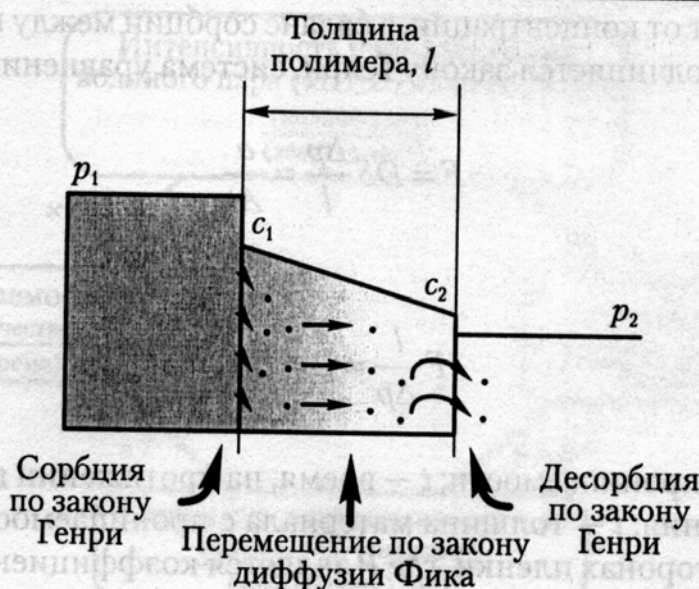


Рис. 8.4. Механизм проницаемости

### 8.5.2.2 Механизм проницаемости

Проницаемость (рис. 8.4) включает в себя три этапа:

- 1) проникающая молекула из сжимающейся жидкой фазы при парциальном давлении  $p_1$  проходит сквозь поверхность полимера; для давления ниже одной атмосферы значение концентрации проникающего вещества между фазами полимера подчиняется закону Генри;
- 2) следуя закону диффузии Фика, проникающее вещество диффундирует внутри пленки полимера, следуя со стороны высокой концентрации к стороне низкой концентрации.;
- 3) проникающее вещество (пермеат) покидает противоположную границу раздела фаз, чтобы диффундировать в смежной непрерывной фазе (жидкая или газовая фаза) при давлении  $p_2$ .

### 8.5.2.3 Проницаемость водяного пара и газов

Решение уравнения диффузии сквозь беспористую полимерную пленку в устойчивом состоянии производится по формуле:

$$F = -D \frac{\Delta c}{l}, \quad (8.16)$$

где  $F$  — поток сквозь пленку (или интенсивность передачи газа, ИПГ,  $GTR$ ),  $\Delta c$  — концентрация проникающего вещества на межфазной границе полимер/газ;  $c_1 - c_2$  и  $D$  — коэффициент диффузии; значение  $c$  может быть соотнесено с парциальным давлением  $p$  за счет закона равновесия Генри:

$$c = Sp, \quad (8.17)$$

где  $S$  — коэффициент растворимости (в кг проникающего вещества на  $m^3$  полимера  $\cdot$  Па).

Когда  $D$  не зависит от концентрации, а баланс сорбции между проникающим веществом и полимером подчиняется закону Генри, система уравнений (8.16) и (8.17) дает

$$F = DS \frac{\Delta p}{l} = \frac{q}{At} \quad (8.18)$$

и

$$F \frac{l}{\Delta p} = P = DS, \quad (8.19)$$

где  $P$  — коэффициент проницаемости;  $t$  — время, на протяжении которого происходит процесс проникновения;  $l$  — толщина материала с проницаемостью  $P$ ;  $\Delta p$  — разница давлений на обеих сторонах пленки, где  $P$  является коэффициентом проницаемости;  $A$  — площадь упаковки, подверженная процессу проникновения с одинаковым значением проницаемости;  $q$  — общее количество проникающего вещества по всей подвергаемой этому воздействию площади за время  $t$ .

Анализ размерности  $P$  показывает, что в том случае, если коэффициент растворимости выражается в  $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{Па}$ , то основной единицей  $P$  является время

$$[P] = [D][S] = \frac{L^2}{\theta} \frac{\theta^2}{L^2} = [\theta] \text{ или } c \text{ в системе СИ.}$$

Из системы уравнений (8.18) и (8.19) получается широко известное соотношение для  $P$ .

$$P = \frac{ql}{tA\Delta p}. \quad (8.20)$$

Соотношение между интенсивностью перемещения водяного пара (ИПВП), ИПГ, проникновением, нормированным ИПВП и коэффициентом проницаемости  $P$  представлено на рис. 8.5.

### Пример 8.6

Интенсивность перемещения кислорода сквозь полиэтиленовую пленку толщиной в 1 мил, ИПГ, равна  $F = 3,5 \cdot 10^{-2} \text{ г}/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$ , а перепад парциального давления через пленку  $\Delta p$  равен 30 мм рт. ст. Требуется рассчитать проницаемость и коэффициент проницаемости.

Решение:

$$\text{Проницаемость} = GTR \cdot \text{толщина} \cdot \frac{1}{\Delta p};$$

$$\frac{1}{\Delta p} = \frac{3,5 \cdot 10^{-2} \text{ г}}{30 \text{ ч} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{мм рт. ст.}} = 1,17 \cdot 10^{-3} \frac{\text{г}}{\text{ч} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{мм рт. ст.}};$$

$$\text{Проницаемость} = \frac{\text{ИПГ}}{\Delta p} \cdot \text{толщина} = \frac{1,17 \cdot 10^{-3} \text{ г} \cdot 2,54 \cdot 10^{-3} \text{ см}}{\text{ч} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{мм рт. ст.}} = 2,96 \cdot 10^{-6} \frac{\text{г} \cdot \text{см}}{\text{ч} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{мм рт. ст.}}$$

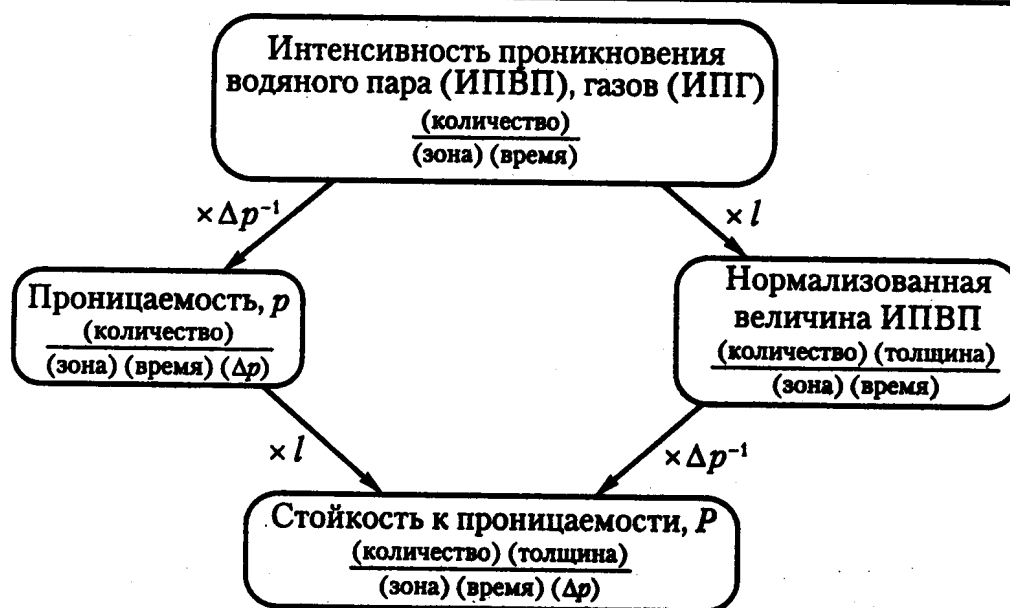


Рис. 8.5. Соотношение между интенсивностью проникновения водяного пара (WVTR, ИПВП), газов (GTR, ИПГ), проницаемостью, нормализованной величиной ИПВП и стойкостью к проницаемости

### Пример 8.7

Требуется рассчитать коэффициент проницаемости для пленки воды, толщина которой составляет 38,1 мкм (1,5 мил), со значением ИПВП, равным 0,1 г/дм² при 38 °С и относительной влажности в 90% (условия ASTM).

**Решение:**

Для расчета  $R$  необходимо умножить ИПВП на толщину и разделить на перепад давления по всей пленке

$$R = \text{ИПВП} \cdot \frac{1}{\Delta p}$$

Поскольку

$$\text{Относ. влажность } RH = \frac{p}{p_s} \cdot 100,$$

где  $p_s$  — давление насыщения пара,

$$p = \frac{p_s}{100} RH.$$

Следовательно,

$$\Delta p = p_o - p_i = \frac{p_s}{100} (RH_o - RH_i).$$

В соответствии с тестом ASTM E 96  $p_i = 0$ , поскольку находится в равновесии с влагопоглотителем. В соответствии с [37] при 49,7 мм рт. ст.

$$\Delta p = \frac{49,7}{100} \cdot 90 = 44,73 \text{ мм рт. ст.} = 5,88 \cdot 10^{-2} \text{ атм} = 5,964 \text{ Па};$$

$$R = \frac{\text{ИПВП} \cdot l}{\Delta p} = \frac{0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 38,1 \cdot 10^{-6}}{5964 \cdot 3600 \cdot 24} = 7,40 \cdot 10^{-18} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па}} = 9,8 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па}}.$$

#### 8.5.2.4 Факторы, воздействующие на проницаемость

1. Соответствующий уровень взаимодействия полимера и проникающего вещества определяется их химической структурой. Для каждой пары полимер/пермеат существует некоторое значение проницаемости.

2. Морфология полимера: увеличение кристалличности полимера (плотности), ориентации или взаимопересечения компонентов уменьшает проницаемость.
3. Влажность повышает или понижает проницаемость (особенно это касается гидрофильных полимеров). Для *EVON* и Нейлона 6 проницаемость кислородом повышается при повышении относительной влажности, однако в аморфном нейлоне проницаемость для кислорода снижается.
4. Повышение температуры ведет к увеличению проницаемости.
5. Наполнители, как правило, снижают проницаемость, однако этот эффект зависит также от типа, формы и количества наполнителя и его взаимодействия с проникающим веществом.
6. Концентрация проникающего вещества, как правило, не имеет значения при низком и умеренном давлении газов и низкой активности для органических соединений в пределах закона Генри. Влияние концентрации обнаруживается при высоких значениях активности [32].
7. Пластификаторы чаще всего (но не всегда) увеличивают проницаемость.
8. Толщина пленки принципиально не влияет на проницаемость, коэффициент диффузии или растворимость. Тем не менее пленки различной толщины могут иметь различную морфологию, создаваемую, например, за счет параметров охлаждения в процессе обработки.
9. Известно, что молекулярная масса полимера лишь в незначительной степени воздействует на его проницаемость, за исключением очень малых значений молекулярных масс.

#### 8.5.2.4.1 Воздействие температуры

Изменение проницаемости вслед за изменением температуры выражается следующим уравнением:

$$P = P_0 e^{\frac{E_p}{RT}}, \quad (8.21)$$

где  $E_p$  — энергия активации;  $R$  — газовая постоянная;  $P_0$  — предэкспоненциальный множитель;  $T$  — температура, К.

Если значение проницаемости  $P_1$  задано при температуре  $T_1$ , то при известном  $E_p$  может быть рассчитано значение проницаемости  $P_2$  при  $T_2$ .

$$P_2 = P_1 \cdot \exp \frac{E_p}{R} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right). \quad (8.22)$$

Эту формулу можно записать как

$$P_2 = P_1 \cdot f, \quad (8.23)$$

где

$$f = \exp \frac{E_p}{R} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right). \quad (8.24)$$

Таблица 8.18. Коэффициенты проницаемости, диффузии и растворимости

	Темпера- тура, °C	$P$	$E_p$	$S \times E^3$	$D \times E^{10}$
ПЭНП ( $d = 0,914$ г/мл)					
H <sub>2</sub>	25	6,4E + 03		1,6E + 00	4,7E - 01
He	25	3,2E + 03	3,5E + 01	5,0E - 02	6,8E + 00
O <sub>2</sub>	25	1,9E + 03	4,3E + 01	4,7E - 01	4,6E - 01
CO <sub>2</sub>	25	7,0E + 02	3,9E + 01	2,5E + 00	3,7E - 01
N <sub>2</sub>	25	6,3E + 02	4,9E + 01	2,3E - 01	3,2E - 01
CH <sub>4</sub>	25	1,9E + 03	4,7E + 01	1,1E + 00	1,9E - 01
H <sub>2</sub> O	25	5,9E + 04	3,4E + 01		
ПЭВП ( $d = 0,964$ г/мл)					
He	25	7,4E + 02	3,0E + 01	2,8E - 02	3,1E + 00
O <sub>2</sub>	25	2,6E + 02	3,5E + 01	1,8E - 01	1,7E - 01
CO <sub>2</sub>	25	2,3E + 02	3,0E + 01	2,2E - 01	1,2E - 01
N <sub>2</sub>	25	9,5E + 01	4,0E + 01	1,5E - 01	9,3E - 02
CH <sub>4</sub>	25	2,5E + 02	4,1E + 01	5,1E - 01	5,7E - 02
H <sub>2</sub> O	25	7,8E + 03			
Полипропилен ( $d = 0,964$ г/мл), кристалличность 50%					
He	20	2,4E + 02	3,2E + 01		2,0E + 01
O <sub>2</sub>	25	6,2E + 02	4,8E + 01		
CO <sub>2</sub>	25	2,1E + 03	3,8E + 01		
N <sub>2</sub>	25	8,0E + 01	5,6E + 01		
H <sub>2</sub> O	30	4,4E + 04	4,2E + 01		
Полиэтилен-копропилен 40/60, аморфный					
N <sub>2</sub>	24,1	3,5E + 03	4,2E + 01	4,4E - 01	9,4E - 01
Полистирен двухосной ориентации					
He	25	1,2E + 04			
O <sub>2</sub>	25	1,1E + 03			
CO <sub>2</sub>	25	3,5E + 03			
N <sub>2</sub>	25	5,2E + 02			
H <sub>2</sub> O	25	7,3E + 05	-8,0E + 00		
Полиакрилонитрил (Вагех)					
O <sub>2</sub>	25	3,5E + 00			
CO <sub>2</sub>	25	1,0E + 01			
H <sub>2</sub> O	25	4,2E + 05			
Поливинилацетат					
He	30	8,2E + 03	1,3E + 01	7,8E - 02	6,5E + 00
O <sub>2</sub>	30	3,1E + 02	5,6E + 01	6,4E - 01	5,6E - 02
CH <sub>4</sub>	25	2,0E + 01	8,3E + 01	1,4E + 00	1,7E - 03
Этилен на виниловом спирте (Е 32%)					
O <sub>2</sub> (отн. влажн. 0%)	25	3,0E - 02			
O <sub>2</sub> (отн. влажн. 65%)	25	2,0E - 01			
H <sub>2</sub> O	25	3,1E + 05			

Таблица 8.18 (Продолжение)

	Темпера- тура, °C	$P$	$E_p$	$S \times E^3$	$D \times E^{10}$
Этилен на виниловом спирте (Е 44%)					
O <sub>2</sub> (отн. влажн. 0%)	25	1,5E - 01			
O <sub>2</sub> (отн. влажн. 65%)	25	3,0E - 01			
H <sub>2</sub> O	25	1,1E + 05			
ПВХ, непластифицированный					
O <sub>2</sub>	25	2,9E + 01	5,6E + 01	2,9E - 01	1,2E - 02
CO <sub>2</sub>	25	1,0E + 02	5,7E + 01	4,7E - 00	2,5E - 03
N <sub>2</sub>	25	7,7E + 00	6,9E + 01	2,3E - 01	3,8E - 03
CH <sub>4</sub>	25	1,8E + 01	6,6E + 01	1,7E + 00	1,3E - 03
H <sub>2</sub> O	25	1,8E + 05	2,3E + 01	8,7E + 02	2,4E - 02
O <sub>2</sub> (пластифицированный)	25	3,2E + 03			
Поливинилиденхлорид (Saran)					
O <sub>2</sub>	30	3,3E + 00	6,7E + 01		
CO <sub>2</sub>	30	1,9E + 01	5,2E + 01		
N <sub>2</sub>	30	6,0E + 01	7,0E + 01		
H <sub>2</sub> O	25	6,0E + 03	4,6E + 01		
H <sub>2</sub> S	30	2,3E + 01	7,5E + 01		
Политетрафторэтилен (Тефлон)					
O <sub>2</sub>	25	2,8E + 03	1,9E + 01	2,1E + 00	1,5E - 01
CO <sub>2</sub>	25	6,5E + 03	1,4E + 01		
N <sub>2</sub>	25	8,6E + 02	2,4E + 01	1,2E + 00	8,8E - 02
CH <sub>4</sub>	90	3,3E + 03	3,4E + 01	1,7E + 00	2,2E - 01
Полиисопрен, резина,					
O <sub>2</sub>	25	1,5E + 04	2,9E + 01	1,0E + 00	1,7E + 00
CO <sub>2</sub>	25	9,9E + 04	2,2E + 01	9,2E + 00	1,3E + 00
N <sub>2</sub>	25	6,1E + 03	3,6E + 01	6,1E - 01	1,2E + 00
H <sub>2</sub> O	25	1,5E + 06			
CH <sub>4</sub>	25	2,0E + 04	3,1E + 01	2,6E + 00	8,9E - 01
ПЭТФ, кристалличность 40%					
O <sub>2</sub>	25	2,2E + 01	3,2E + 01	7,2E - 01	3,5E - 03
CO <sub>2</sub>	25	8,0E + 01	1,8E + 01	2,0E + 01	6,0E - 04
N <sub>2</sub>	25	3,9E + 01	3,3E + 01	4,5E - 01	1,3E - 03
H <sub>2</sub> O	25	8,5E + 04	2,9E + 00		
CH <sub>4</sub>					
ПЭТФ, аморфный					
O <sub>2</sub>	25	3,8E + 01	3,8E + 01	9,8E - 01	4,5E - 03
CO <sub>2</sub>	25	2,0E + 02	2,8E + 01	2,8E + 01	8,0E - 04
Поликарбонат (lexan)					
O <sub>2</sub>	25	9,1E + 02	1,9E + 01	5,0E + 00	2,1E - 02
CO <sub>2</sub>	25	5,2E + 03	1,6E + 01	1,2E + 01	4,8E - 03
N <sub>2</sub>	25	1,9E + 02	2,5E + 01		
H <sub>2</sub> O	25	9,1E + 05			6,8E - 01

Таблица 8.18 (Окончание)

	Темпера- тура, °C	$P$	$E_p$	$S \times E^3$	$D \times E^{10}$
Нейлон 6					
O <sub>2</sub> (отн. влажн. 100%)	25	2,5E + 01	4,4E + 01		2,4E - 02
CO <sub>2</sub>	25	5,0E + 01	4,1E + 01		
N <sub>2</sub>	25	3,5E + 00	4,7E + 01		
H <sub>2</sub> O	25	1,2E + 02			
Нейлон 6,6 тянутый					
CO <sub>2</sub>	25	4,5E + 01		1,5E + 01	
Нейлон 11					
CO <sub>2</sub>	40	6,5E + 02	3,4E + 01	4,9E - 01	1,9E - 02
Целлофан					
O <sub>2</sub> (отн. влажн. 0%)	25	1,4E + 00			2,4E - 02
O <sub>2</sub> (отн. влажн. 76%)	25	5,7E + 00			
CO <sub>2</sub> (отн. влажн. 0%)	25	3,0E + 00			
CO <sub>2</sub> (отн. влажн. 76%)	25	4,7E + 01			
N <sub>2</sub> (отн. влажн. 0%)	25	2,1E + 00			
N <sub>2</sub> (отн. влажн. 76%)	25	4,8E + 00			
H <sub>2</sub> O	25	1,6E + 07			

Примечание: Вышеприведенные значения рассматриваются как ориентировочные.  $P$  — л (STP) · мкм/(м<sup>2</sup> · день · кПа),  $D$  — м<sup>2</sup>/с,  $S$  — л (STP)/кПа,  $E_p$  — кДж/моль; ПЭНП — полиэтилен низкой плотности, ПЭВП — полиэтилен высокой плотности.

### 8.5.2.5 Определение проницаемости

Определение ИПВП описывается в ASTM E96. Определение проникающей способности O<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub> задается в ASTM D 1434. Для органических соединений стандарт ASTM отсутствует, однако непрерывные и квазистатические методы рассматриваются в [19]. Использование анализа консистенции для определения проницаемости на основе экспериментальных данных по постоянному потоку рассмотрен в [20].

### 8.5.2.6 Многослойные структуры

Проницаемость стенки упаковки, представляющей собой некоторую многослойную структуру при температуре  $T$ , задается уравнением

$$P_T = \frac{L_T}{\sum_i^n \frac{l_i}{P_i}} \quad (8.25)$$

где  $P_T$  — общий коэффициент проницаемости данной структуры;  $L_T$  — общая толщина стенки упаковки ( $L_T = \sum l_i$ );  $n$  — количество слоев;  $l_i$  и  $P_i$  — коэффициенты толщины и проницаемости каждого из слоев.



Таблица 8.19. Значения  $f$  (уравнение 8.23)

$T_2, ^\circ\text{C}$	$E_p, \text{ккал/моль}$																			
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	18	20	13	14	15	20
0	0,629	0,538	0,461	0,395	0,338	0,290	0,248	0,213	0,182	0,156	0,134	0,115	0,098	0,084	0,062	0,045				
2	0,654	0,568	0,493	0,428	0,372	0,323	0,280	0,243	0,211	0,183	0,159	0,138	0,120	0,104	0,078	0,059				
4	0,681	0,599	0,527	0,463	0,408	0,359	0,315	0,278	0,244	0,215	0,189	0,166	0,146	0,129	0,100	0,077				
6	0,708	0,631	0,562	0,501	0,447	0,398	0,355	0,316	0,282	0,251	0,224	0,199	0,178	0,158	0,126	0,100				
8	0,736	0,664	0,599	0,541	0,488	0,441	0,398	0,359	0,324	0,293	0,264	0,239	0,215	0,194	0,158	0,129				
10	0,764	0,699	0,639	0,584	0,534	0,488	0,446	0,408	0,373	0,341	0,312	0,285	0,260	0,238	0,199	0,166				
12	0,793	0,734	0,680	0,629	0,582	0,539	0,499	0,462	0,428	0,396	0,366	0,339	0,314	0,291	0,249	0,213				
14	0,823	0,771	0,723	0,677	0,635	0,595	0,557	0,522	0,489	0,459	0,430	0,403	0,378	0,354	0,311	0,273				
16	0,853	0,810	0,768	0,728	0,691	0,655	0,622	0,590	0,559	0,531	0,503	0,477	0,453	0,429	0,386	0,348				
18	0,885	0,849	0,815	0,783	0,751	0,721	0,692	0,665	0,638	0,612	0,588	0,564	0,542	0,520	0,479	0,442				
20	0,916	0,890	0,865	0,840	0,816	0,792	0,770	0,748	0,726	0,705	0,685	0,666	0,647	0,628	0,593	0,559				
22	0,949	0,933	0,916	0,901	0,885	0,870	0,855	0,840	0,825	0,811	0,797	0,783	0,770	0,757	0,731	0,706				
24	0,982	0,976	0,971	0,965	0,959	0,953	0,948	0,942	0,937	0,931	0,925	0,920	0,914	0,909	0,898	0,888				
25	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000				
26	1,016	1,022	1,027	1,033	1,038	1,044	1,049	1,055	1,061	1,066	1,072	1,078	1,084	1,090	1,101	1,113				
28	1,051	1,068	1,086	1,104	1,123	1,141	1,160	1,180	1,199	1,219	1,240	1,260	1,281	1,303	1,347	1,392				
30	1,086	1,117	1,148	1,180	1,213	1,247	1,281	1,317	1,354	1,392	1,431	1,471	1,512	1,554	1,642	1,735				
32	1,122	1,166	1,212	1,259	1,309	1,360	1,413	1,469	1,526	1,586	1,648	1,713	1,780	1,850	1,997	2,157				
34	1,159	1,217	1,279	1,343	1,411	1,482	1,557	1,635	1,718	1,804	1,895	1,991	2,091	2,196	2,423	2,674				
36	1,196	1,270	1,348	1,431	1,520	1,613	1,713	1,818	1,930	2,049	2,175	2,309	2,451	2,602	2,933	3,305				
38	1,235	1,324	1,421	1,524	1,635	1,754	1,882	2,019	2,166	2,323	2,492	2,673	2,868	3,077	3,541	4,075				
40	1,273	1,380	1,496	1,622	1,758	1,905	2,067	2,238	2,426	2,630	2,850	3,089	3,349	3,630	4,264	5,010				
42	1,313	1,438	1,574	1,724	1,888	2,067	2,264	2,479	2,714	2,972	3,254	3,564	3,902	4,273	5,124	6,144				
44	1,353	1,497	1,656	1,831	2,026	2,241	2,478	2,741	3,032	3,354	3,710	4,103	4,539	5,020	6,142	7,514				
46	1,394	1,558	1,740	1,944	2,172	2,426	2,710	3,028	3,383	3,779	4,222	4,716	5,269	5,886	7,346	9,168				
48	1,436	1,620	1,828	2,062	2,326	2,624	2,961	3,340	3,768	4,252	4,796	5,411	6,105	6,887	8,766	11,158				
50	1,478	1,684	1,918	2,185	2,490	2,836	3,231	3,681	4,193	4,776	5,441	6,198	7,061	8,044	10,438	13,546				

## 8.5.2.6.1 Проницаемость

Соотношение  $\frac{P_i}{l_i} = R$  представляет собой проницаемость слоя. Уравнение (8.25) может быть представлено следующим образом:

$$R_T = \left( \sum \frac{1}{R_i} \right)^{-1}, \quad (8.26)$$

где  $R_T$  — общая проницаемость конструкции;  $R_i$  — значение проницаемости каждого слоя.

## 8.5.2.6.2 ИПВП

Аналогично, для ИПВП

$$\frac{\Delta P_T}{(\text{ИПВП})_T} = \sum_i^n \left( \frac{\Delta p}{(\text{ИПВП})_i} \right) \quad (8.27)$$

или

$$(\text{ИПВП})_T = \frac{\Delta P_T}{\sum_i^n \left( \frac{\Delta P}{(\text{ИПВП})_i} \right)}. \quad (8.28)$$

## Пример 8.8

Рассчитать общую проницаемость кислородом следующей многослойной конструкции мкм/(м<sup>2</sup> · сут · кПа).

	Полимер	Толщина, мкм	$P_i$ при 25 °C	$E_i$ , ккал/моль
Слой 1	ПЭНП	18	1900	10,2
Слой 2	Нейлон 6	10	25,0	11,5
Слой 3	ПП	20	620	11,5

Решение:

Исходя из уравнения (8.25), следует:

$$\frac{L_T}{P_T} = \sum_i^3 \frac{l_i}{P_i};$$

$$P_T = \frac{L_T}{\sum_i^3 \frac{l_i}{P_i}};$$

$$L_T = 18 + 10 + 20 = 48 \text{ мкм};$$

$$\sum_i^3 \frac{l_i}{P_i} = \frac{l_1}{P_1} + \frac{l_2}{P_2} + \frac{l_3}{P_3} = \frac{18}{1900} + \frac{10}{25} + \frac{20}{620} = 0,4417 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{сут} \cdot \text{кПа}}{\text{л}};$$

$$P_T = \frac{48}{0,4417} = 109 \frac{\text{л} \cdot \text{мкм}}{\text{м}^2 \cdot \text{сут} \cdot \text{кПа}}.$$

Воздействие температуры на проницаемость многослойной конструкции выглядит следующим образом:

$$P_T = \frac{L_T}{\sum_i \frac{l_i}{P_{i,i} f_i}}, \quad (8.29)$$

где  $f_i$  дано в уравнении (8.24) и может быть выведено для каждого слоя из табл. 8.19 или рисунка 8.6, а  $P_{i,i}$  представляет собой проницаемость каждого из слоев конструкции  $i$  при температуре  $T$ . Уравнение (8.29) выглядит следующим образом:

$$\left( \frac{P_T}{L_T} \right)^{-1} = \sum_i \frac{l_i}{P_{i,i} f_i}. \quad (8.30)$$

### Пример 8.8

Рассчитать общую проницаемость кислородом  $P_T$  для следующей конструкции при температуре 40 °С. Значения  $P$  были получены при температуре 25 °С.

Номер слоя	Тип полимера	Толщина, мкм	$P_i$ при 25 °С, $\frac{\text{л} \cdot \text{мкм}}{\text{м}^2 \cdot \text{сут} \cdot \text{кПа}}$	$E_i$ , ккал/моль (из табл.)
1	ПЭ	18	1900	10,3
2	Нейлон 6	10	25,0	10,5
3	ПП	20	1500	11,5

Значения  $f_1 = 2,29$ ,  $f_2 = 2,34$  и  $f_3 = 2,53$  получены из табл. 8.19.

$$L_T = l_1 + l_2 + l_3 = 48 \text{ мкм}.$$

Используя уравнение (8.30), получаем:

$$P_T = \left( \frac{18}{1900 \cdot 2,29} + \frac{10}{25 \cdot 2,34} + \frac{20}{1500 \cdot 2,53} \right)^{-1} \cdot 48;$$

$$P_T = 266 \frac{\text{л} \cdot \text{мкм}}{\text{м}^2 \cdot \text{сут} \cdot \text{кПа}}.$$

*Примечание:* Если бы данные расчеты основывались исключительно на защитном слое из нейлона 6 без учета барьерных свойств ПЭНП и ПП, то получилось бы следующее выражение:

$$P_T = 280 \frac{\text{л} \cdot \text{мкм}}{\text{м}^2 \cdot \text{сут} \cdot \text{кПа}}.$$

### 8.5.2.7 Применение проницаемости в оценке сечения материала и срока хранения

Для простого сравнения на рисунках 8.7 и 8.8 представлены значения газопроницаемости. Информация о значениях проницаемости органических соединений была обобщена в 1996 г. [21].

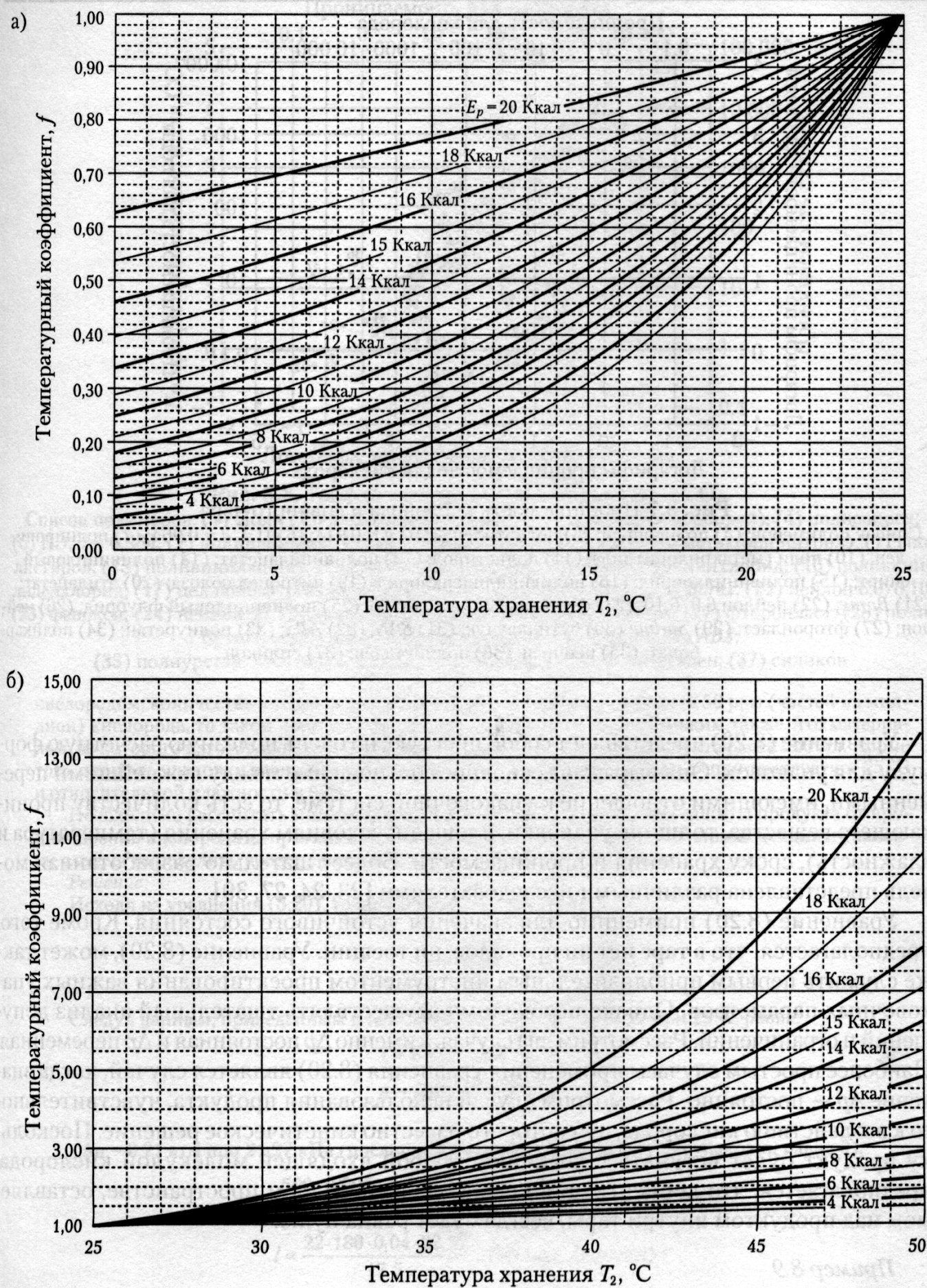


Рис. 8.6. Значения  $f$  (уравнение 8.23): а) для  $0\text{ °C} < T_1 < 25\text{ °C}$ ; б) для  $25\text{ °C} < T_1 < 50\text{ °C}$



Рис. 8.7 Проницаемость кислорода и водяного пара.

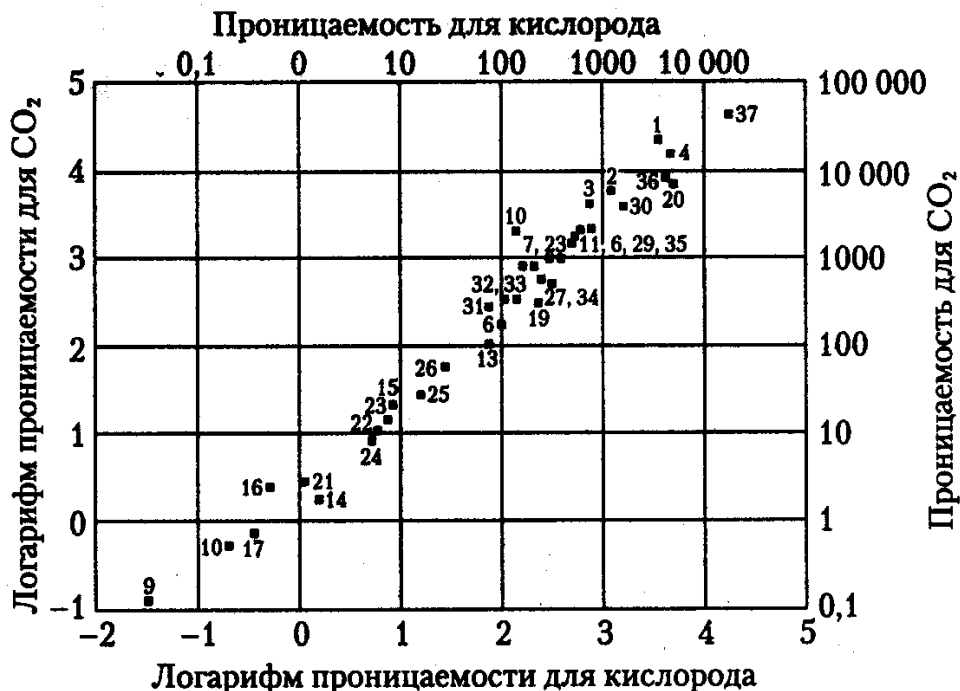
Список полимеров: (4) полисопрен; (5) полиэтилен (ПЭ)  $d = 0,914$ ; (6) ПЭ,  $d = 0,964$ ; (7) полипропилен; (10) поли (метакрилонитрил); (11) полистирол; (13) поливинилацетат; (14) поливиниловый спирт; (15) поливинилхлорид; (16) поливинилиденхлорид; (19) нитроцеллюлоза; (20) этилацетат; (21) *Barex*; (22) нейлон 6,9/6,10; (23) фенокси; (24) нейлон 66; (25) поливиниловый флуорид; (26) нейлон; (27) фторопласт; (29) *Surlyn*; (30) бутилкаучук; (31) *SAN*; (32) *ABS*; (33) полиуретан; (34) поликарбонат; (35) неопрен; (36) полибутаден; (37) силикон

Уравнение (8.20) представляет собой простую, но очень полезную расчетную формулу для упаковок. Она выражает основное соотношение между важнейшими переменными, имеющими отношение к упаковочной системе, то есть количеству проникающего вещества, толщине упаковки, площади, условиям хранения (температура и влажность), сроку хранения и проницаемости. Более тщательно разработанная модель представлена различными исследователями [23, 24, 27, 39].

Уравнение (8.20) применимо для значения устойчивого состояния. Кроме того, предполагается, что в таре нет ни проколов, ни трещин. Уравнение (8.20), может также служить первым приближительным инструментом проектирования важных упаковочных параметров. Однако необходимо осуществлять тщательный анализ допущений и ограничений. Рассмотрим два случая, а именно  $\Delta p$  постоянная и  $\Delta p$  переменная. Наиболее простым случаем применения уравнения (8.20) является случай, когда значение  $\Delta p$  — постоянно. Рассмотрим случай использования продукта, чувствительного к воздействию кислорода, для которого известно кинетическое решение. Поскольку продукт будет вступать в реакцию с любой входящей молекулой кислорода, предполагается, что концентрация кислорода в свободном пространстве, оставляемом над продуктом внутри тары, всегда будет равна нулю.

### Пример 8.9

Рассчитать минимальную толщину упаковки для защиты продукта и предотвращения его потери. Продукт с высокой влажностью включает в себя соединение, которое вступает в реакцию с кислородом, результаты которой нежелательны. Анализ показал, что если продукт реагирует с

Рис. 8.8. График проницаемости кислорода и  $\text{CO}_2$ .

Список полимеров: (1) Поли (1,3 бутadiен); (2) гуттаперча; (3) поли (хлоропрен); (4) полиisопрен; (6) ПЭ,  $d = 0,964$ ; (7) полипропилен; (9) поли (акрилонитрил); (10) поли (метакрилонитрил); (11) полистирол; (13) поливинилацетат; (14) поливиниловый спирт; (15) поливинилхлорид; (16) поливинилиденхлорид; (17) целлюлоза; (19) нитроцеллюлоза; (20) этилацетат; (21) *Barex*; (22) нейлон 6,9/6,10; (23) фенокси; (24) нейлон 66; (25) поливиниловый флуорид; (26) нейлон; (27) фторопласт; (28) полибутилен; (29) *Surlyn*; (30) бутилкаучук; (31) *SAN*; (32) *ABS*; (33) полиуретан; (34) поликарбонат; (35) неопрен; (36) полибутадиен; (37) силикон

кислородом, количество которого равно 0,005% (от объема воды), то есть 50 ppm (частей на миллион) кислорода, то такой продукт непригоден для продажи. Предположим также, что материалом, из которого изготовлена упаковка, является ПЭТ, и что объем продукта равен 500 мл. Кроме того, площадь упаковки равна  $400 \text{ см}^2$  и ожидается, что она будет храниться при температуре  $25^\circ\text{C}$  и относительной влажности в 60%.

Необходимо рассчитать минимальную толщину, необходимую для защиты продукта от проникновения кислорода на протяжении 6 мес. Дополнительно для рассчитанной толщины упаковки следует определить уровень потери влаги на протяжении 6 месяцев.

**Решение:**

Исходя из уравнения (8.20), толщина упаковки составляет:

$$l = \frac{PtA\Delta p}{q}$$

Следуя данным, приведенным в табл. 8.19, проницаемость ПЭТ при  $25^\circ\text{C}$  равна:

$$t = 6 \text{ мес} = 180 \text{ дней};$$

$$A = 400 \text{ см}^2 = 0,04 \text{ м}^2;$$

$\Delta p = 0,21 \text{ атм}$  при 21,27 кПа (предположим, что значение  $p_i$  внутри упаковки равно 0);

$$q = \frac{500}{32} \cdot \frac{0,005}{100} \cdot 22,414 = 17,5 \text{ л (STP) кислорода};$$

$$l = \frac{22 \cdot 180 \cdot 0,04 \cdot 22,27}{17,5} = 193 \text{ мкм (7,6 мил)}^1.$$

<sup>1</sup> 1 мил = 0,025 мм.



То же самое уравнение может быть использовано для расчета потери влаги. Поскольку значение  $\Delta p$  постоянное, внутри упаковки находится достаточное количество влаги, которое позволило бы сохранить активность воды неизменной на протяжении всего срока хранения упаковки. Решение для  $q$ :

$$q = \frac{P_t A \Delta p}{l};$$

$$t = 180 \text{ дней};$$

$$A = 0,04 \text{ м}^2;$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = 8,5 \cdot 10^4 \frac{\text{л (STP)} \cdot \text{ммк}}{\text{м}^2 \cdot \text{сут} \cdot \text{кПа}} \text{ (из табл. 8.19);}$$

$$\Delta p = p_s \cdot \left( \frac{100 - 60}{100} \right) = 1,267 \text{ кПа};$$

$$p_s = 23,76 \text{ мм рт.ст} = 3,17 \text{ кПа};$$

$$q = \frac{8,5 \cdot 10^4 \cdot 180 \cdot 0,04 \cdot 1,267}{193} = 4,017 \text{ л (STP)} = 3,2 \text{ г воды}.$$

Если значение  $\Delta p$  на протяжении срока хранения продукта меняется, уравнение (8.20) использоваться не может. Этот случай характерен для чувствительных к воздействию влаги продуктов, в которых проходят процессы ее сорбции. В упрощенных расчетах гистерезис сорбционных изотерм не учитывается, однако изотерма сорбции продукта должна быть известна.

Содержание влаги в продуктах, чувствительных к воздействию влаги, изменяется вместе с относительной влажностью, с которым оно находится в равновесии, и наоборот. Соотношение между содержанием влаги в продукте и относительной влажностью пространства, оставляемого над продуктом в таре, выражается сорбционной изотермой продукта. Если предположить, что относительная влажность вне упаковки (относительная влажность хранения  $p_o$ ) постоянна, то изменение значения  $\Delta p$  на протяжении срока хранения представляет собой функцию содержания влаги в продукте,  $\Delta p = p_o - p_i(M)$ , где  $M$  — содержание влаги в сухой массе продукта. Дифференциал количества воды  $dq$ , проникшей сквозь упаковку, равен дифференциалу содержания влаги, умноженному на массу продукта в сухом состоянии  $W$ , то есть  $dq = W dM$ . Для продуктов, чувствительных к воздействию влаги, срок хранения может быть выражен следующим образом:

$$t = \frac{lW}{AP} \int_{M_1}^{M_2} \frac{dM}{p_o - p_i(M)}, \quad (8.31)$$

где значения  $M_1$  и  $M_2$  относятся соответственно к начальному и конечному содержанию влаги внутри продукта.

Пользуясь данным уравнением, можно рассчитать значение срока хранения продукта, определяемое как время, на протяжении которого упакованный продукт, чувствительный к воздействию влаги, при определенных условиях хранения остается в

приемлемом состоянии. Уравнение (8.31) соотносит срок хранения продукта с площадью, толщиной, массой продукта и условиями его хранения. Приведенные выше уравнения могут быть использованы в следующих условиях:

1. Существование стойкого равновесия между продуктом и внутренними условиями упаковки.
2. Задержка при достижении устойчивого состояния проницаемости сквозь упаковочный материал не учитывается.
3. Температура и внешняя влажность постоянны на протяжении всего срока хранения.
4. На проницаемость не воздействует никакое другое проникающее соединение.

Для расчета времени  $t$  в случае нелинейных изотерм необходимо численное интегрирование уравнения (8.31). Возможны упрощенные решения этого уравнения — например, если участок нужной изотермы может быть линейным:

$$Y = a + bM,$$

где  $Y$  — относительная влажность.

В результате интегрирования уравнения (8.31) получается следующее выражение:

$$t = \frac{lW}{PAp_s b} \ln \frac{Y_o - Y_{i,t=0}}{Y_o - Y_{i,t}},$$

где  $Y_o$  — внешняя относительная влажность;  $Y_i$  — относительная влажность в пространстве, оставляемом над продуктом внутри тары.

### Пример 8.10

Продукт, масса в сухом состоянии которого  $W = 80$  г, а значение  $b = 9,0$  кг продукта/кг  $H_2O$ , предполагается хранить при температуре в  $23^\circ C$  и 85% относительной влажности.

Первоначальная равновесная относительная влажность продукта  $Y_{i,t=0} = 20\%$ . Итоговая равновесная относительная влажность продукта  $Y_{i,t} = 70\%$ . Проницаемость упаковочного материала составляет:

$$P = 4 \cdot 10^{-2} \frac{\text{кг} \cdot \text{мкм}}{\text{м}^2 \cdot \text{сут} \cdot \text{кПа}}.$$

Требуется рассчитать максимальную площадь упаковки, необходимую для поддержания равновесной относительной влажности продукта  $RH_i$  на уровне 70% (или ниже) на протяжении 100 дней. Толщина упаковки при этом составляет 53 мкм.

*Решение:*

$$l = 53 \text{ мкм};$$

$$W = 80 \text{ г} = 0,08 \text{ кг};$$

$$P = 4 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{мкм}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут} \cdot \text{кПа});$$

$$p_s = 21,07 \text{ мм рт. ст.} = 28,1 \text{ кПа};$$

$$b = 9,0;$$

$$\ln \frac{Y_o - Y_{i,t=0}}{Y_o - Y_{i,t}} = \frac{85 - 20}{85 - 70} = 1,466;$$



$$A = \frac{53 \cdot 0,08}{4 \cdot 10^{-2} \cdot 100 \cdot 2,81 \cdot 9} \cdot 1,466 = 6,14 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2.$$

Ввиду уникального сочетания свойств, технологий и экономических аспектов, полимерные материалы представляют собой весьма многогранный материал, преимущества которого и в дальнейшем будут использоваться в пищевой промышленности.

## Литература

1. Albrant, P. D. — Bekum America Co., Williamston, MI, 1996. (Personal communication).
2. Alcoa, Form 992-100-6093, Crawfordville, IN. — 1990.
3. Axelson, L. and Cavlin, S. Aseptic integrity and microhole determination of packages by gas leakages detection // *Pack. Tech. Sci.* — 1991. — № 4. — P. 9–20.
4. Bezigian, T. 1996. (Personal communication).
5. Blatz, P. Properties of films from blends of amorphous and crystalline nylons. — *AIChE Nat. Conf.* — 1989. — April 2–6.
6. Brown, W. E. *Plastics in Food Packaging*. — NY: Dekker, 1992.
7. Chirife, J. and Iglesias, H. A. *Handbook of Food Isotherms: Water Sorption Parameters for Food and Food Components*. — NY: Academic Press, 1982.
8. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. — 64th ed. — Boca Raton, FL: CRC Press, 1983. — F162
9. Cunningham, R. E. and Williams, R. J. *Diffusion in Gases and Porous Media*. — NY: Plenum Press, 1980.
10. Davis, D. S. Ethylene incorporation in polypropylene: effect on thermal-related properties // *J. Plastic Film Sheeting*. — 1992. — № 8(4). — P. 101–108.
11. Dick, J. S. *Compounding Materials for the Polymer Industry*. — NJ: Noyes Publications, 1987.
12. Felts, J. T. Transparent barrier coatings update: flexible substrates // *J. Plastic Film Sheeting*. — 1993. — № 9. — P. 201.
13. Fish, M. *Modern Plastic Encyclopedia*. — 1992. — P. 146.
14. Floros, J. D. and Gnanasekharan, V. Principles, technology and application of destructive and non-destructive package integrity testing // *Advances in Aseptic Processing Technology* / Singh, R. K. and Nelson, P. E. (ed.). — Ch. 7. — London: Elsevier, 1992.
15. Foster, R. Ethylene-vinyl alcohol copolymers (EVOH) // *The Wiley Encyclopedia of Packaging Technology* / Bakker, M. (ed). — NY: John Wiley & Sons, 1986. — P. 270–275.
16. Gibbs, D. S. and Wessling, R. A. Vinylidene chloride and poly(vinylidene chloride) // *Kirk-Othmer: Encyclopedia of Chemical Technology*. — Vol. 23. — NY: Interscience Publishers, 1983. — P. 764–798.
17. Gruenwald, G. *Thermoforming: A Plastic Processing Guide*. — Lancaster, PA: Technomics, 1987.
18. Hernandez, R. J. Effects of water vapor on the transport properties of oxygen through polyamides packaging materials // *J. Food Eng.* — 1994. — № 22. — P. 495–507.
19. Hernandez, R. J., Giacin, J. R., and Baner, A. L. The evaluation of the aroma barrier properties of polymer films // *J. Plastic Film Sheeting*. — 1986. — № 2 (July). — P. 187–211.
20. Hernandez, R. J. and Gavara, R. Consistency test for continuous flow permeability experimental data // *J. Plastic Film Sheeting*. — 1993. — № 6(April). — P. 126–138.
21. Hernandez, R. J. and Giacin, J. R. Factors affecting permeation, sorption, and migration processes in packaging-product systems // *Taub, I. and Singh, P. R. (eds.)*. — 1996. — (ACS Monograph Series).
22. Jensen, P. H. Testing of package integrity based on CO<sub>2</sub> on a trace gas / *IAPRI Symposium*. — 9–12 October. — Reims, France, 1994.
23. Karel, M. Packaging protection for oxygen-sensitive products // *Food Res.* — 1974. — № 14. — P. 340.

24. Kim, J. N. An Application of the Finite Difference Method to Estimate the Shelf-Life of a Packaged Moisture Sensitive Pharmaceutical Tablet: M. S. Thesis / School of Packaging. — Ann Arbor, MI: Michigan State University, 1992.
25. Nylon Plastics / Kohan, M. I. (ed.). — NY: John Wiley & Sons, 1973.
26. Polymers: An Encyclopedic Sourcebook of Engineering Properties / Kroschwitz, J. (ed.). — NY: John Wiley, 1987. — (Encyclopedia Reprint Series).
27. Labuza, T. P., Mizrahi, S., and Karel, M. Mathematical model for optimization of flexible film packaging of food for storage // Trans. ASAE. — 1972. — № 15. — P. 150.
28. Lachance, K. Meeting FDA regulations for food packaging made clear // Packag. Technol. Eng. — 1966. — № 7. — P. 44.
29. Laermer, S. F. and Zambetti, F. F. Alpha-tocopherol (vitamin E) — the natural antioxidant for polyolefins // J. Plastic Film Sheeting. — 1992. — № 8. — P. 228–248.
30. Landvatter, G. R. Ethylene-vinyl acetate (EVA) // Modern Plastics Encyclopedia Handbook, NY: McGraw-Hill, 1994. — P. 39.
31. Leonard, E. A. Packaging Economics. — NY: Books for Industry, 1980.
32. Liu, K. I., Hernandez, R. J., and Giacini, J. R. The effect of water activity and vapor activity on the permeation of toluene vapor through a two-side PVDS coated oriented polypropylene film // J. Plastic Film Sheeting. — 1991. — № 7. — P. 56–67.
33. Manders, P. W. Polyethylene: new branches of the polymer family extend into specialized applications // Modern Plastic Encyclopedia. — 1995. — (Nov). — B3–B6.
34. Mergenhausen, L. K. Ethylene acid copolymer // Modern Plastics Encyclopedia. — NY: McGraw-Hill, 1992. — P. 64.
35. Mobil OPP Films, Product Characteristics / Mobil. — Chadds Ford, PA: Mobil Chemical Company, 1994.
- 35a. Modern Plastic: Guide to Plastics. — NY: McGraw-Hill, 1987.
36. McCrum, N. G., Buckley, C. P., and Bucknall, C. B. Principle of Polymer Engineering. — NY: Oxford University Press, 1988.
37. Perry, R. H. and Green, D. W. Perry's Chemical Engineers' Handbook. — 6th ed. — NY: McGraw-Hill, 1984. P. 3–247.
38. Pascall, M. A., Harte, B., Giacini, J., and Gray, I. Decreasing lipid oxidation in soybean oil by a UV absorber in the packaging material // J. Food Sci. — 1995. — № 60(5). — P. 1116–1118.
39. Pocas, M. F. Modeling the moisture transfer of two-component food products in a flexible package: M. S. Thesis / School of Packaging. — Ann Arbor, MI: Michigan State University, 1995.
40. Progelhof, R. C. and Throne, J. L. Polymer Engineering Principles. — NY: Hanser Publisher, 1993.
41. Radosta, J. A. Talc anti-blocks for maximized LLDPE blown film performance // J. Plastic Film Sheeting. — 1991. — № 7. — P. 81–189.
42. Reed, R. W. and Vaughan, D. Surlyn A ionomer. I. The effect of ionic bonding on polymer structure. II. The effect of ionic bonding on solid state and melt properties // Polymer Preprints. — 1965. — № 1(1).
43. Rice, J. Opting for OPP // Food Process. — 1995. — Jan. — P. 71–73.
44. Sajaki, T. and Giacini, J. R. Permeation of ethyl acetate vapor through silica deposited PET films and composite structures // J. Plastic Films Sheeting. — 1993. — № 9. — P. 97.
45. Simon, D. F. Single-site catalysts produce tailor-made consistent resins // Packaging Tech. Eng. — 1994. — April. — P. 34–37.
46. Smith, M. A. High density polyethylene // The Wiley Encyclopedia of Packaging Technology, / Bakker, M. (ed.) — NY: John Wiley & Sons, 1986. — P. 514–523.
47. Statz, R. J. Ionomer // Modern Plastics Encyclopedia Handbook — NY: McGraw-Hill, 1994. — P. 41–42.
48. Toebe, J. M., Hoojjat, H., Hernandez, R. J., Giacini, J. R., and Herte, B. R. Interaction of flavour components from an onion/garlic sour cream with HIPS // Packag. Technol. Sci. — 1990. — № 3. — P. 133–140.

49. Toensmeier, P. A. Modern Plastics. — 1995. — Feb. — P. 44z-47.
50. Treybal, R. E. Mass Transfer Operations. — 3rd ed. — Ch. 2. — NY: McGraw-Hill, 1980.
51. Van Drumpt, J. Modern Plastic Encyclopedia. — 1992 — Oct. — P. 150-154.
52. Van Drevelen, D. W. Propetries of Polymers. — 3rd ed. — NY: Elsevier, 1990.
53. Young, G. New materials transform fresh-produce packaging // Convert. Mag. — 1966. — (July). — P. 78-79.
54. Youngquist, G. R. Diffusion flow of gases in porous solids // Ind. Eng. Chem. — 1970. — № 62(8). — P. 52-63.

# 9 КИНЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССОВ ПОРЧИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРОКОВ ХРАНЕНИЯ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

*Петрос С. Таукис, Теодор П. Лабуза и И. Сэм Саги*

*Перевод Д. Рапопорта под науч. ред. к. т. н., доцента Базарновой Ю. Г.*

## Содержание

- 9.1 Введение
- 9.2 Кинетика процессов ухудшения качества пищевых продуктов
  - 9.2.1 Принципы моделирования реакций
  - 9.2.2 Влияние факторов окружающей среды
    - 9.2.2.1 *Температура*
    - 9.2.2.2 *Влияние прочих факторов окружающей среды*
- 9.3 Применение кинетических методов для прогнозирования и контроля сроков хранения пищевых продуктов
  - 9.3.1 Ускоренные методы оценки сроков хранения
  - 9.3.2 Применение температурно-временных индикаторов (ТВИ, ТТТ) для мониторинга сроков хранения
- 9.4 Примеры использования кинетического моделирования
  - 9.4.1 Кинетические расчеты
  - 9.4.2 Примеры моделирования сроков годности пищевых продуктов при хранении
    - 9.4.2.1 *Шоколадный напиток, подслащенный аспартамом*
    - 9.4.2.2 *Пример комплексной пищевой системы*

Литература

Дополнительная отечественная литература

## 9.1 Введение

Качество — это такое свойство пищевых продуктов, которое по праву привлекает огромное внимание. *Качество пищевых продуктов* может быть определено как некоторый набор свойств, который позволяет различать отдельные единицы продуктов и влияет на степень приемлемости данного продукта для пользователя или потребителя [58].

Исходя из природы пищевых продуктов как физико-, химико- и биологически активных систем, качество пищевых продуктов — это динамическое состояние, непрерывно изменяющееся, стремящееся ко все более низким (за исключением процессов созревания и старения) уровням. Следовательно, для каждого отдельного продукта существует некоторое конечное время с момента его производства, в течение которого он при заданных условиях хранения сохраняет требуемый уровень органолептических свойств и безопасность. Это время и может быть определено как *срок хранения* пищевого продукта. Единого повсеместно применимого определения этого понятия не существует, так как и оно само, и критерии выявления окончания срока хранения зависят от типа продукта и целей применения данного понятия (например, нормативные или маркетинговые цели).

Некоторыми ведущими организациями пищевой отрасли были предложены различные определения этого понятия, которые можно использовать в качестве своего рода рекомендаций. Так, Международный институт холода (*International Institute of Refrigeration, IIR*) предлагает два определяющих термина для замороженных продуктов. Один из них — *срок хранения с высоким качеством* (СХВК) — это время от момента замораживания продукта до начала развития едва заметных органолептических изменений (70–80% правильных ответов при треугольном сенсорном тесте). Другой тип определения срока хранения, который может быть распространен и на другие виды пищевых продуктов, — *практический срок хранения* (ПСХ). ПСХ — это период собственно хранения (в замороженном виде) после обработки (замораживания) продукта с начально высоким качеством в течение срока, когда органолептические свойства продукта определяют его потребление или соответствующую технологическую обработку. Как правило, ПСХ в два-три раза продолжительнее СХВК.

Термин, введенный ЕЭС и имеющий нормативный характер для этикетирования продуктов (*time of minimum durability*, время появления признаков минимальной порчи), под которым понимается период времени, в течение которого пищевой продукт сохраняет свои специфические свойства при правильном режиме хранения, принципиально отличается от вышеприведенных определений, так как относится собственно к свойствам продукта безотносительно его применения (потребления). Этот термин является рабочим в области пищевых технологий и согласуется с фундаментальным принципом — «продукт наивысшего качества — это продукт, только что выработанный» [1].

Тем не менее, поскольку в этом случае определяющими являются характерные свойства продукта, следует принять решение, на каком уровне потребитель может обнаружить изменение какого-либо показателя или признаки развития нежелательных свойств. Например, если присутствие какого-либо специфического аромата означает отсутствие других ароматов, необходимо решить, какие уровни их интен-

сивности могут быть определены потребителем. Таким образом, это определение оказывается тесно связанным с определением СХВК.

Любое определение, предназначенное для использования в качестве рабочего инструмента, должно сопровождаться дополнительными рекомендациями, то есть значение органолептического показателя качества обязано быть точно определенным с описанием соответствующих методов измерений и критериев установки приемлемых допусков [2].

Обычно общее качественное состояние данного пищевого продукта лучше всего описывается путем органолептической оценки с помощью специально подготовленной комиссии экспертов, работающей по «стандартизованной» гедонистической шкале [74]. Подобный подход не обходится без проблем. Большие трудности представляет определение значимой оценочной шкалы для каждого из пищевых продуктов и, кроме того, комиссия экспертов не полностью отражает вкусы потребителей, в связи с чем интересы их отдельных групп могут оказаться неучтенными [84]. Даже при учете всех вышеописанных факторов необходимо решить вопрос об уровне «отсечки приемлемости». То время, когда большой (заранее установленный) процент членов экспертной комиссии решает, что данный продукт находится или выходит за пределы «уровня приемлемости», и является сроком хранения (ПСХ). Подобный критерий подразумевает указание доли потребителей, для которых данный продукт будет приемлемым до конца срока хранения, и некоторую переменную долю, относительно которой требуется особое соглашение или указание. Еще одной проблемой, связанной с органолептической оценкой, являются существенные затраты на организацию широкой комиссии экспертов и обеспечение вкусовых проб испорченных продуктов или продуктов, входящих в группу риска. В некоторых случаях рост микроорганизмов или деградация питательных веществ в продукте могут достигать недопустимых уровней, в то время как сам продукт признается комиссией органолептически вполне приемлемым.

Органолептическая информация не является достаточно объективной для принятия управленческих мер, а также в спорных случаях или при юридических спорах. В некоторых случаях потребители могут быть приучены к более низким стандартам из-за потребления пищевых продуктов постепенно снижающегося качества. Все это демонстрирует необходимость поиска альтернативных возможностей более чистой оценки качества [39].

При изучении качества пищевых продуктов широко используются химические, физические и микробиологические методы контроля. Используемые потребителем характеристики (например, аромат, цвет, текстурные свойства) могут быть определены (установлены) инструментально или химическими методами. Изучение химических и биохимических реакций, а также физических изменений, происходящих в данном продукте в ходе или после его производства (обработки) позволяет распознать те из них, которые наиболее важны относительно его безопасности, целостности и общего качества. Физико-химические и микробиологические параметры можно использовать при количественной оценке качества. Значения этих параметров могут быть соотнесены с результатами органолептической оценки данного продукта, и становится возможным установление своего рода нижней границы качества по органолептическим показателям [2]. Вместе с тем следует учитывать, что корреляция

значений отдельных химических параметров с органолептическими данными зачастую не столь линейна, поскольку общее органолептическое качество обусловлено сочетанием множества изменяющихся факторов [137]. Относительный «вклад» каждого такого фактора в «общее качество» на различных уровнях качества и при различных условиях хранения может существенно отличаться.

Несмотря на вышеуказанные трудности в определении и оценке качества, а также в определении сроков хранения пищевых продуктов, в последние годы наблюдается значительный прогресс в разработке научных и общепризнанных подходов к этим проблемам. Данная область по-прежнему остается предметом постоянных исследований. Углубленное изучение различных механизмов ухудшения качества пищевых продуктов, систематический анализ и интерпретация получаемых результатов ведут к нахождению более объективных способов оценки качества и определения сроков хранения. Для создания эффективных методов контроля качества пищевых продуктов и анализа получаемых результатов очень важно правильное применение принципов химической кинетики к проблеме изучения процессов ухудшения их качества.

## 9.2 Кинетика процессов ухудшения качества пищевых продуктов

### 9.2.1 Принципы моделирования реакций

Согласно фундаментальным принципам химической кинетики скорость изменения качества пищевых продуктов в общем виде может быть выражена как функция от состава продукта и факторов окружающей среды [116]:

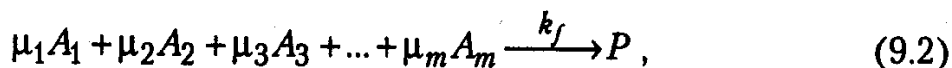
$$\frac{dQ}{dt} = F(C_i, E_j), \quad (9.1)$$

где  $C_i$  — факторы состава пищевого продукта (например, концентрация вступающих в реакцию веществ, неорганические катализаторы, ферменты, ингибиторы реакций, рН, активность воды и популяции микроорганизмов);  $E_j$  — факторы окружающей среды (например, температура, относительная влажность, общее и парциальное давление различных газов, освещенность и механические нагрузки).

Таким образом, при изучении кинетики изменения качества пищевых продуктов мы сталкиваемся с физико-химической системой высокой сложности, включающей огромное число физических и химических параметров и коэффициентов, которые в большинстве случаев практически невозможно определить количественно. Даже если такую систему можно было бы выразить в измеримых параметрах, аналитического ее решения все равно не существовало бы, а точные численные решения были бы слишком сложными и трудоемкими для возможности их практического применения в пищевых технологиях.

Учитывая вышесказанное, была выработана методика, включающая, во-первых, выявление химических и биохимических реакций, влияющих на качество и безопас-

ность данного пищевого продукта, и, во-вторых, оценка этих реакций (путем тщательного изучения компонентов продукта и технологического процесса) для выявления их влияние на скорость процесса порчи продукта [67]. Путем исключения эффекта воздействия факторов окружающей среды  $E_j$ , предполагая их постоянными на наиболее вероятном уровне или признавая их воздействие в ожидаемых пределах пренебрежимо малым, предложена упрощенная схема реакций, которая отражает действие концентраций различных вступающих в реакции веществ. Главная цель — смоделировать изменения концентраций компонентов, влияющих на качество пищевого продукта, как функцию от времени. Уравнение молекулярных необратимых реакций обычно выражается в виде



где  $A_j$  — конкретное вступающее в реакцию вещество;  $\mu_j$  — соответствующий стехиометрический коэффициент ( $j = 1, 2, \dots, m$ );  $P$  — продукты;  $k_f$  — константа скорости реакции.

Для подобной схемы скорость реакции  $r$  выражается [41] как

$$r = \frac{1}{\mu_m} \frac{d[A_j]}{dt} = k_f [A_1]^{n_1} [A_2]^{n_2} \dots [A_m]^{n_m}, \quad (9.3)$$

где  $n_m$  — порядковый номер реакции относительно вещества  $A_m$ ; для истинно молекулярной реакции  $n_m = \mu_m$ .

Чаще всего деградация важных компонентов продукта представляет собой сложную многостадийную реакцию, для которой сложно определить отдельные промежуточные стадии и выделить их продукты. Многие реакции являются обратимыми и представляются в форме



В данном случае  $A$  реагирует с  $B$ , где  $k_f$  — константа скорости прямой реакции, и получаются продукты  $C$  и  $D$ , которые могут вступать в обратную реакцию с константой скорости  $k_b$ . Уравнение скорости реакции в этом случае будет:

$$r = \frac{-d[A]}{\alpha dt} = \frac{-d[B]}{\beta dt} = \frac{+d[C]}{\gamma dt} = \frac{+d[D]}{\delta dt} = k_f [A]^\alpha [B]^\beta - k_b [C]^\gamma [D]^\delta. \quad (9.5)$$

Для большинства процессов в пищевых системах или  $k_b$  пренебрежимо мала относительно  $k_f$ , или для некоторого представляющего интерес промежутка времени они несопоставимы, то есть  $[C]$  и  $[D]$  очень малы, что позволяет нам рассматривать реакцию как необратимую. В большинстве случаев концентрация продуктов реакции, обуславливающих общее качество продукта, ограничено мала, а исходные вещества присутствуют в относительно больших количествах, и таким образом их



изменением во времени можно пренебречь [66]. Это позволяет выразить уравнение потери качества с помощью концентраций отдельных вступающих в реакцию веществ:

$$r = \frac{-d[A]}{dt} = k'_f [A]^\alpha, \quad (9.6)$$

где  $\alpha$  — кажущийся или псевдопорядковый номер реакции по компоненту  $A$ ;  $k'_f$  — кажущаяся константа скорости.

Другим примером, также приводящим к уравнению скорости, сходному с (9.6), является случай, когда вступающие в реакцию вещества находятся в стехиометрическом отношении [40]. Тогда из уравнения (9.3) получаем:

$$r = k_f \prod_i^m [A_i]^{n_i} = k_f \left( \prod_i^m \mu_i^{n_i} \right) \left[ \frac{A_1}{n_1} \right]^{\sum n_i} \quad (9.7)$$

или

$$r = \frac{-d[A]}{dt} = k'_f [A]^\alpha, \quad (9.8)$$

где  $A = A_1$ ;  $\alpha = \sum n_i$ , общий порядок реакции.

Основываясь на вышеприведенном анализе и учитывая сложность пищевых систем, деградация качества пищевого продукта и сокращение срока хранения на практике представляется как потеря желаемых факторов качества  $A$  (то есть биологически ценных, а также питательных веществ, характерных ароматов) или формирование нежелательных факторов  $B$  (то есть потеря вкуса/аромата, обесцвечивание). Отношения потери факторов  $A$  и формирования факторов  $B$  выражаются уравнением (9.6), а именно

$$r_A = \frac{-d[A]}{dt} = k[A]^m; \quad (9.9)$$

$$r_B = \frac{d[B]}{dt} = k'[B]^{m'}. \quad (9.10)$$

Факторы качества  $[A]$  и  $[B]$  представляют собой обычно выражаемые количественно химические, физические, микробиологические или органолептические параметры, характерные для конкретной пищевой системы. И  $k$ , и  $k'$  — это кажущиеся константы скорости реакции, а  $m$  и  $m'$  — порядки реакций. Здесь необходимо еще раз подчеркнуть, что уравнения (9.9) и (9.10) не представляют истинный механизм реакции, а  $m$  и  $m'$  — совершенно не обязательно истинные порядки реакции относительно веществ  $A$  и  $B$ , а скорее кажущиеся или псевдопорядки. Эти кажущиеся порядки реакции определяются путем подстановки изменений экспериментально измеренных значений  $[A]$  и  $[B]$  во времени в уравнения (9.9) или (9.10). Методы расчета можно в общем подразделить на а) дифференциальные и б) интегральные методы [3, 41].

При экспериментальном изучении кинетики невозможно измерить собственно скорость реакции. Вместо этого измеряются (прямо или косвенно) концентрации  $A$  или  $B$  как функции от времени. Если эти концентрации наложить на график относительно времени и сопоставить кривые графически или статистически (например, с помощью полиномиальной регрессии), можно получить скорости реакций (графическим или численным дифференцированием данных кривых). Взяв логарифм обеих частей уравнений (9.9) и (9.10), получим следующие линейные выражения:

$$\log r_A = \log k + m \log [A]; \quad (9.11)$$

$$\log r_B = \log k' + m' \log [B]. \quad (9.12)$$

Для определения значений констант в эти уравнения подставляются экспериментальные данные (обработанные с помощью метода наименьших квадратов) [4].

При использовании метода дифференцирования возможны два подхода. В случае первого проводится дифференцирование данных, полученных с помощью однократной экспериментальной проверки. Это требует измерений изменения концентрации веществ  $A$  или  $B$  во времени по крайней мере до 50%-й глубины протекания этих изменений [5]. Второй подход подразумевает дифференцирование данных, полученных из измерений начальной скорости. При таком подходе замеры концентраций выполняются при очень небольших их изменениях — например, 5%, и это повторяется при нескольких различных начальных концентрациях вступающих в реакцию веществ. Таким образом, каждая из оцениваемых скоростей соответствует той или иной начальной концентрации веществ и подразумевает отдельную экспериментальную проверку. При таком методе сталкиваются еще с одной трудностью — как получить данные кинетических экспериментов, при которых скорость изменяется очень быстро даже при небольшой глубине превращений (например, при ферментных (энзиматических) реакциях). При этом необходимо получить начальный ряд из набора точек, характеризующихся высокой скоростью изменений в ряду, а значит характеризующихся с неизбежным разбросом из-за ошибок экспериментов. Привычные методы полиномиальной подстановки при помощи метода наименьших квадратов могут привести к ошибочным оценкам в начальном ряду. Более гибким математическим методом разрешения этих проблем является применение сплайн-функций [146]. Основным преимуществом метода сплайн-функций является использование всех полученных данных для оценки начальной скорости, причем на него не влияют экспериментальные ошибки при определении отдельных точек. В общем, методы дифференцирования включают в себя две статистические методики, и поэтому они более чувствительны к экспериментальному разбросу и требуют для оценки зависимого параметра большего числа экспериментальных данных.

При использовании метода интегрирования переменные выражаются из уравнений (9.9) и (9.10), после чего проводится интегрирование. Например, из уравнения (9.9) имеем:

$$-\int_{A_0}^A \frac{d[A]}{[A]^m} = kt. \quad (9.13)$$

Таблица 9.1. Вид функции качества продукта и период полураспада для реакций разного порядка

Кажущийся порядок (порядковый номер) реакции	Функция качества $Q(A)_t$	Период полураспада $t_{1/2}$
0	$A_0 - A_t$	$A_0/(2k_0)$
1	$\ln(A_0/A_t)$	$\ln 2/k_1$
2	$1/(A_t - 1/A_0)$	$1/(k_2 A_0)$
$m (m \neq 1)$	$\frac{1}{m-1}(A_t^{1-m} - A_0^{1-m})$	$\frac{2^{m-1} - 1}{k_m(m-1)} A_0^{1-m}$

Независимо от значения  $m$  уравнение (9.13) может быть выражено в форме

$$Q(A) = kt, \quad (9.14)$$

где  $Q(A)$  определяется как функция качества данного пищевого продукта.

Вид функции качества данного пищевого продукта для реакций нулевого (кажущегося нуля), первого, второго и  $m$ -го порядка выводится из уравнений (9.13) и (9.14) и приведен в табл. 9.1, где учтен и период полураспада, то есть время, за которое концентрация качественного показателя  $A$  сокращается вдвое относительно его начального значения [5].

Для определения функции качества на базе экспериментальных данных берутся различные значения  $m$  (0, 1 или др.) и подставляются (графически или методом наименьших квадратов) в соответствующие уравнения (табл. 9.1) для экспериментальных данных. Если эксперимент выполнялся по крайней мере до 50%-го изменения (предпочтительнее — до 75%), бывает несложно определить, какой порядок реакций и какие уравнения подходят лучше (или графически, или с использованием статистических критериев). В большинстве случаев достаточным критерием является коэффициент детерминации  $R^2$  линейной регрессии. Значение  $R^2$  для метода наименьших квадратов задается следующим уравнением:

$$R^2 = 1 - \left( \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 / \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2 \right), \quad (9.15)$$

где  $y_i$  — экспериментально полученные значения измеряемого параметра ( $i = 1, \dots, N$ );  $\hat{y}_i$  — значение, полученное из уравнения регрессии;  $\bar{y}_i$  — среднее из наблюдаемых значений;  $N$  — количество измерений [98].

Правильным кажущимся порядком является тот, при котором  $R^2$  ближе к единице. Подавляющее большинство изученных реакций, происходящих в пищевых продуктах, характеризуются как псевдонулевого или псевдопервого порядка [66] (характерные примеры приведены в табл. 9.2).

Как отмечается в работе [66], рекомендуется соблюдать осторожность при принятии решения относительно определения порядка и функции качества. Например,

Таблица 9.2. Важнейшие реакции потери качества продукта, описываемые кинетическими уравнениями нулевого и первого порядка

Нулевой порядок	Общее качество замороженных продуктов
	Неферментативное потемнение
Первый порядок	Потеря витаминов
	Гибель/рост микроорганизмов
	Окислительное обесцвечивание
	Ухудшение текстуры при тепловой обработке

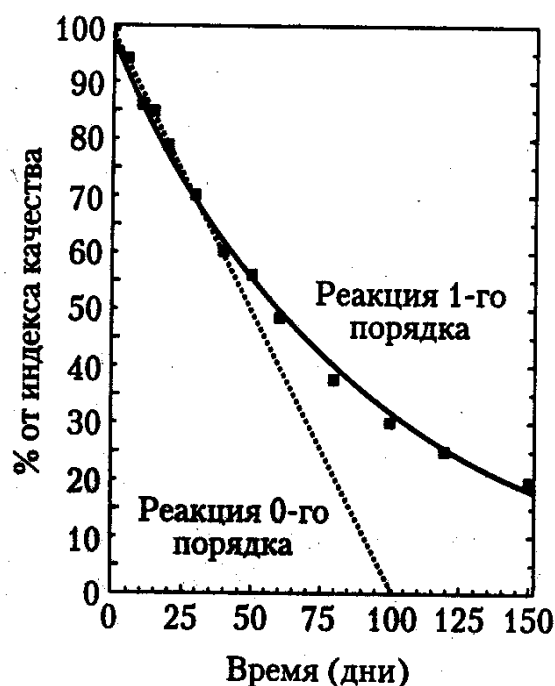


Рис. 9.1. Потеря качества пищевого продукта как функция от времени с указанием различий между реакциями нулевого и первого порядка

когда реакция заходит не слишком глубоко ( $< 50\%$  протекания), реакции нулевого и первого порядка будут неразличимы (рис. 9.1). С другой стороны, если срок годности находится в пределах до 20%-ной глубины протекания реакции, то с точки зрения практики обе модели окажутся достоверными.

Кроме того, чем ниже точность метода измерения фактора качества  $A$ , тем больше степень изменений концентраций реагирующих веществ, до которой следует проводить эксперимент для получения данных с приемлемой точностью оценки константы скорости реакции (рис. 9.2). Следует отметить, что большинство таких измерений в комплексных пищевых продуктах обычно имеют погрешность в 5% и более.

В связи с этим зачастую получают ошибочные результаты, особенно в том случае, если данные используются для экстраполяции на более длительные промежутки времени. К сожалению, это довольно часто наблюдается в литературе. Исследования систем реакций, связанных с потерей качества пищевых продуктов, не доводятся до надлежащих уровней их выполнения, что приводит к определению неверных констант скорости реакций и порядка реакций. Довольно большое число ценных данных при

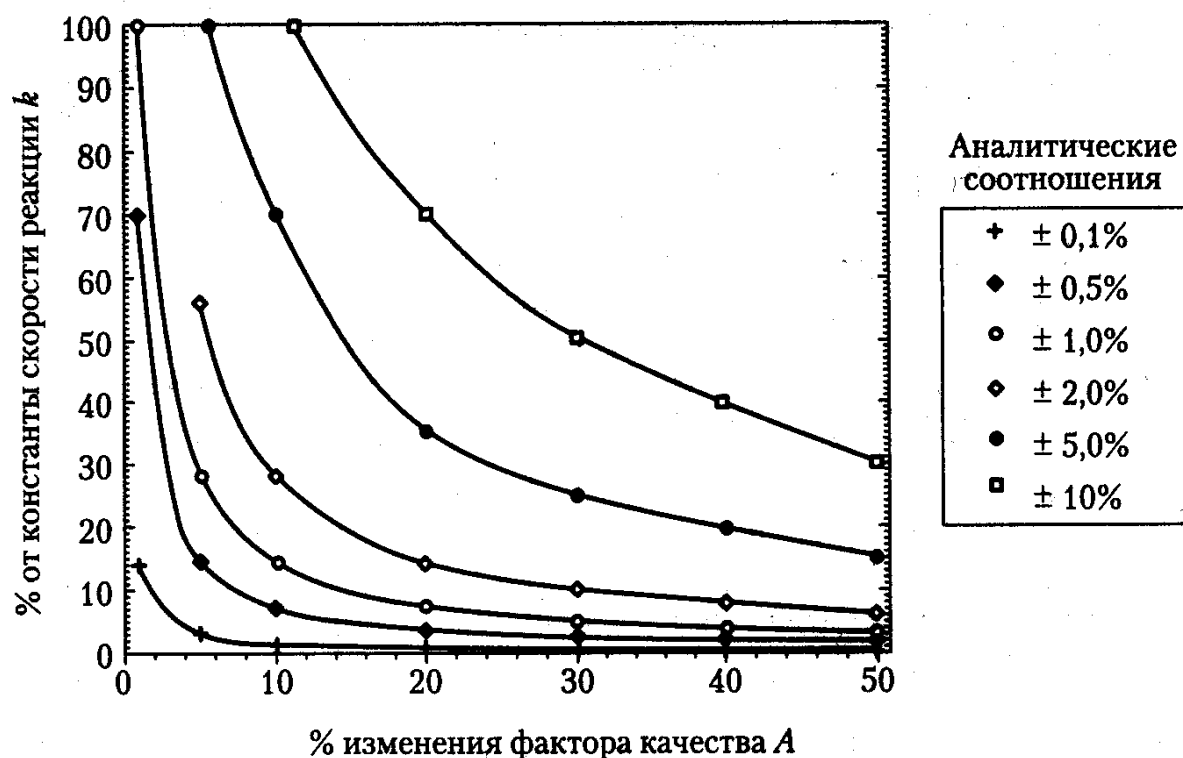


Рис. 9.2. Влияние аналитических соотношений на точность оцениваемой константы скорости реакции  $k$ . По[8].

этом не может быть полностью использовано, а базы данных с параметрами кинетики реакций пищевых продуктов могут содержать множество неопределенностей.

Данные с разбросом значений могут также приводить к тому, что значения  $R^2$ , полученные путем подстановки реакций нулевого и первого порядка, практически не отличаются. В случае реакций первого порядка используются логарифмы измеренных количественных данных (по полулогарифмической шкале), причем применяется  $\ln y_i$  и  $\ln y$ , а не  $y_i$  и  $y$  (см. уравнение 9.15).

Результатом этого является получение больших  $R^2$ , особенно если при этом присутствует большой разброс данных [11]. Все это иногда сказывается на том, что моделям реакций первого порядка предпочтение отдается неверно. В подобных случаях можно рекомендовать использование дополнительного критерия для правильности подстановки. Можно также вместо логарифмического выражения для реакций первого порядка (см. табл. 9.1) использовать экспоненциальное выражение, где

$$A = A_0 \exp(-kt),$$

а подстановка методом наименьших квадратов для расчета параметра  $k$  осуществляется на компьютере. Значение  $R^2$  для такой подстановки берется из уравнения (9.15), и оно непосредственно сравнимо со значением  $R^2$ , полученным методом линейной регрессии из модели первого порядка.

Наконец, следует избегать еще одной ошибки при определении кажущегося порядка реакций, которая связана с реакциями, характеризующимися большим периодом задержки. В течение типичного периода задержки наблюдаются критические промежуточные концентрации. В некоторых случаях продукты вообще не удается

обнаружить, как, например, промежуточные продукты реакции Майяра (неферментативного потемнения).

При изучении реакций с таким периодом задержки наиболее широко применяется метод, при котором каждая информативная точка наносится на график, после чего определяется время появления заметного изменения скорости реакции. Понятно, что подобный подход требует особого внимания, поскольку могут происходить изменения и в механизме реакции. Типичными представителями реакций с периодом задержки являются неферментативные реакции потемнения [65, 117] и процессы роста микроорганизмов.

Как только будет определен кажущийся порядок реакции, формирующей ухудшение качества, необходимо провести статистический анализ и оценку параметра  $k$  (константы скорости) на предмет погрешности в ее определении [70]. Если для оценки параметров используется метод линейной регрессии, с помощью  $t$ -распределения Стьюдента можно рассчитать их 95%-ную достоверность. Помимо пределов достоверности полезным статистическим инструментом является список стандартизованных остатков и их график. Они позволяют оценить, насколько выбранное уравнение может моделировать информацию, а также распознать экстремальные значения, которые могут быть результатом ошибок в эксперименте или иных внешних воздействиях и должны быть исключены из расчетов [2]. Стандартизованные остатки должны быть случайным образом распределены вокруг нуля, обычно в пределах от  $-2$  до  $+2$ . Любые данные, порождающие стандартные остатки, лежащие вне указанного интервала, скорее всего являются посторонними.

При расчете  $k$  альтернативой методу линейной регрессии служит точечный метод или метод длинных интервалов [82, 86], где каждая точка данных представляет независимый эксперимент относительно нулевого времени. Значение  $k$  рассчитывается как среднее от  $n$  отдельных столбцов. В работе [66] было показано, что этими двумя методами получаются сходные интервалы значений  $k$ , а в [70] для получения более узких пределов достоверности рекомендуется использовать как минимум восемь экспериментальных точек. В некоторых случаях экспериментальные данные свидетельствуют о наличии реакций более высокого порядка и даже дробного. Для определения кажущегося порядка  $m$  могут быть использованы два метода. Как уже говорилось выше, можно предположить различные значения  $m$  и, подставив их в функцию качества при  $m \neq 1$  (табл. 9.1), проверить экспериментально. Второй метод заключается в рассмотрении  $m$  как параметра и определения для этого уравнения нелинейной регрессии с помощью метода наименьших квадратов для обеспечения того порядка, который наилучшим образом удовлетворяет экспериментальным данным. Например, было обнаружено, что кинетические реакции второго порядка лучше всего описывают окисление экстрагируемых цветовых пигментов из перца чили [19]. Самоокисление жирных кислот в присутствии избыточного количества кислорода относительно концентрации жирных кислот наилучшим образом описывается моделью половинного порядка [60], тогда как производство гексана при окислении липидов теоретически описывается моделью третьего порядка (кубической) [56].

Как было уже показано, функции развившейся в пищевом продукте потери качественных свойств основаны на четких допущениях и не обязательно отражают истинный механизм реакции. В том случае, когда эти допущения не применимы или

когда истинный механизм под воздействием побочных реакций или ограничивающих промежуточных этапов слишком сложен, уравнения (9.9) и (9.10) могут неадекватно моделировать регистрируемые изменения. В этом случае можно разработать полуэмпирическую кинетико-математическую модель, эффективно отображающую экспериментальные данные. Эта модель должна была бы иметь преимущественно общую форму качественной функции из уравнения (9.14), где  $Q(A)$  может приобретать любую иную форму по сравнению с типичными (см. табл. 9.1). Этапы построения подобной модели описаны в работе [116]. В этом случае можно определить линейные модели с многими переменными, полиномиальные уравнения и нелинейные модели, а то, насколько они соответствуют экспериментальным данным, можно проверить с помощью рассчитанных на компьютере линейных с многими переменными, полиномиальных и нелинейных регрессий. Эмпирические уравнения, моделирующие эффект технологических параметров и параметров состава, можно вывести с помощью статистических экспериментальных методов, например метода поверхностного отклика [135].

Особая категория реакций, важная для пищевых продуктов, — это ферментативные (энзиматические) реакции, и моделируют их обычно с помощью уравнения Михаэлиса–Ментен (*Michaelis–Menten*) [3]. Это функция скорости реакции, основанная на кинетике изменения концентрации фермента в стабильном состоянии [6, 27]. Для некоторой ферментной системы при отсутствии ингибиторов уравнение скорости имеет форму

$$r_A = \frac{k[A]}{K_m + [A]}, \quad (9.16)$$

где  $A$  — субстрат;  $k = k_o(e)$  пропорционально концентрации энзима ( $e$ ) (в биохимической терминологии  $k$  обычно обозначают  $v_{\max}$ ); а  $K_m$  — постоянная ( $r_A = 0,5k$  для  $[A] = K_m$ ).

Когда  $[A] \gg K_m$ , уравнение сводится к реакции нулевого порядка,  $r_A = k$ . Это довольно часто встречается в пищевых продуктах с однородно распределенным избыточным субстратом и небольшим количеством фермента — например, липолиз молочного жира. При  $K_m \gg [A]$  уравнение сводится к уравнению первого порядка:  $r_A = (k/K_m) [A]$ . Это встречается в пищевых продуктах, ферменты которых существенно обособлены и имеют ограниченный доступ к субстрату, или где реакция ограничена субстратом — например, при потемнении тканей овощей и фруктов под действием полифенолоксидазы. Таким образом, с большей частью энзиматических реакций в пищевых продуктах можно работать как с реакциями нулевого или первого порядка. При использовании уравнения скорости реакции Михаэлиса–Ментен применяется трансформация Лайнвивера–Бурка (*Lineweaver–Burk*), позволяющая оценить параметры при помощи линейной регрессии

$$\frac{1}{r_A} = \frac{K_m}{k} \frac{1}{[A]} + \frac{1}{k}. \quad (9.17)$$

Описанный выше дифференциальный метод измерения начальной скорости применяется обычно для анализа кинетики энзиматических реакций.

При использовании какой-либо из вышеописанных моделей для изучения кинетики процессов ухудшения качества ее применимость обычно ограничена конкретной изучаемой пищевой системой. Поскольку данная модель зачастую не соответствует истинному механизму реакции, изменения в составе данной системы могут влиять на скорость изменения параметра качества, что невозможно предсказать с помощью этой модели. Таким образом, экстраполяцию результатов кинетических исследований на сходные системы следует производить с большой осторожностью. В некоторых случаях для изучения эффекта изменений в составе желательно провести углубленное изучение кинетики отдельных реакций, важных для оценки качества пищевого продукта, и по возможности вскрыть их действительный механизм. Подобные исследования проводятся обычно на модельных системах, а не на реальных пищевых продуктах, причем проводится тщательный контроль и мониторинг состава и относительных концентраций отдельных компонентов. Эти исследования особенно полезны в тех случаях, когда проверяется токсикологическое или питательное воздействие аккумуляции продуктов распада, включая промежуточные или побочные реакции. Примерами подобных исследований являются работы по изучению многоступенчатого распада подсластителя аспартама [126] и двухступенчатой обратимой изомеризации  $\beta$ -каротина [100]. В первом случае применялся комплексный статистический анализ с использованием нелинейного многоответного метода, когда все стадии реакции были выражены в форме линейной системы дифференциальных уравнений. При помощи такого метода все экспериментальные данные использовались одновременно для определения кинетических параметров каждого этапа деградации пищевого продукта с помощью многомерного нелинейного регрессионного анализа системы дифференциальных уравнений. Эти параметры могут быть использованы для предсказания концентрации каждого продукта, получающегося при деградации, как функции от времени при любой температуре.

## 9.2.2 Влияние факторов окружающей среды

### 9.2.2.1 Температура

Рассмотренные подходы к кинетике процессов ухудшения качества пищевой системы предполагали, что условия окружающей среды постоянны. Кинетическая модель для изучения процессов ухудшения качества важна не только для определения свойств данного пищевого продукта, но и для определения условий окружающей среды в ходе эксперимента. Эти условия могут задавать скорости реакций и должны определяться и контролироваться в ходе кинетических экспериментов.

Так как большинство факторов окружающей среды не являются постоянными, логично было бы распространить данные модели на рассмотрение этих факторов в качестве переменных, особенно тех из них, которые существенно влияют на скорости реакций и могут изменяться в процессе хранения продукта. Практический подход выражается в моделировании эффекта для кажущейся константы скорости реакции, то есть в выражении  $k$  из уравнения (9.9) как функцию  $E_j$ :  $k = k(E_j)$ .



Из всех упоминавшихся выше факторов окружающей среды (температура, относительная влажность, общее и парциальное давление различных газов, освещенность и механические напряжения) наиболее часто рассматривается и изучается температура. Это и понятно, поскольку температура не только существенно влияет на скорости реакций, но и непосредственно «прикладывается» к пищевому продукту извне (непосредственный эффект окружающей среды), в то время как другие факторы, по крайней мере до некоторой степени, контролируются упаковкой пищевого продукта.

История фундаментальных исследований по термодинамическим аспектам разработки моделей влияния температуры на ход реакций изложена в обзоре [13]. Преобладающей и широко распространенной моделью является уравнение Аррениуса, полученное из законов термодинамики и принципов статистической механики, где

$$\frac{\partial \ln K_{eq}}{\partial (1/t)} = \frac{\Delta E^0}{R}. \quad (9.18)$$

Было показано, что отношение Аррениуса, полученное теоретически для обратимых молекулярных химических реакций, эмпирически подходит для некоторых более сложных химических и физических явлений (например, вязкости, растворения, сорбции). Химические реакции, обуславливающие ухудшение качества пищевых продуктов, выраженные с помощью вышеизложенных кинетических моделей, при изменении температуры также следуют поведению, описанному Аррениусом. Для систем  $m$ -го порядка, приведенных в табл. 9.1, константа скорости реакции является функцией температуры (при предположении, что остальные  $E_j$ -факторы постоянны), описываемой следующим уравнением, непосредственно получаемым из уравнения (9.18) путем замены  $k_{eq}$  на  $k$ :

$$k = k_A \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right), \quad (9.19)$$

где  $k_A$  — константа из уравнения Аррениуса;  $E_A$  — барьер избыточной энергии, который фактор  $A$  должен преодолеть для деградации продукта, обычно называемый *энергией активации*. Практически это означает, что если значения  $k$  наблюдаются при различных температурах, а  $\ln k$  откладывается на графике относительно обратной величины абсолютной температуры ( $1/T$ ), то получается прямая линия с уклоном  $-E_A/R$ :

$$\ln k = \ln k_A - \frac{E_A}{R} \left(\frac{1}{T}\right). \quad (9.20)$$

Если известны константы  $k_2$  и  $k_1$  при двух температурах  $T_2$  и  $T_1$ , то параметры Аррениуса можно рассчитать из уравнений

$$E_A = \ln\left(\frac{k_2}{k_1}\right) \frac{RT_1 T_2}{T_2 - T_1}, \quad (9.21)$$

$$k_A = k_1^{\left(\frac{T_1}{T_1 - T_2}\right)} k_2^{\left(\frac{T_2}{T_2 - T_1}\right)} \quad (9.22)$$

Поскольку в определение значений  $k$  включена экспериментальная ошибка, расчеты  $E_A$  только по двум точкам дадут уже существенную ошибку. Точность расчета энергии активации по уравнению (9.21) проверялась в работе [41]. Обычно скорость реакции определяется по трем и более температурам, а  $k$  относительно  $1/T$  откладывается на полулогарифмическом графике или используется подстановка линейной регрессии, после чего применяется уравнение (9.20).

Следует отметить, что для функции Аррениуса не существует эксплицитной относительной температуры, выраженной уравнением (9.19) (подразумевается температура в 0 К, при которой  $k$  будет равно  $k_A$ ). В качестве альтернативы уравнению (9.19) зачастую рекомендуют выбор относительной температуры в соответствии со средней температурой описываемого процесса. Для большинства условий хранения такой типовой (эталонной) температурой является 300 К, а для термических процессов — 373,15 К (100 °С). В этом случае модифицированное уравнение Аррениуса может быть записано как

$$k = k_{ref} \exp \left( -\frac{E_A}{R} \left[ \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right] \right), \quad (9.23)$$

где  $k_{ref}$  — константа скорости при эталонной температуре  $T_{ref}$ .  
Соответственно, уравнение (9.20) модифицируется к виду

$$\ln k = \ln k_{ref} - \frac{E_A}{R} \left[ \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right]. \quad (9.24)$$

Вышеприведенная трансформация важна для стабильности в ходе численного интегрирования и оценки параметров. Кроме того, применение константы относительной скорости реакции (помимо придания этой константе соответствующего физического значения) обуславливает применимость данного уравнения в рамках конечного диапазона температур, включая типовую (эталонную) температуру, соответствующую интересующему нас диапазону. Действительно, как мы увидим ниже, уравнение Аррениуса может по-разному использоваться ниже или выше определяемых температур, что связано с переходными явлениями.

Когда применяются приемы регрессии, для определения 95%-ного уровня достоверности параметров Аррениуса вновь используется статистический анализ. Если доступны лишь три значения  $k$ , диапазон достоверности обычно бывает шире. Для достижения значимых более узких диапазонов достоверности при оценке  $E_A$  и  $k_A$  требуется большее количество экспериментальных результатов. Схема оптимизации для оценки необходимого количества экспериментов для получения наибольшей точности при наименьших затратах труда была предложена в работе [80]. Авторы сделали вывод, что на практике оптимальными являются пять или шесть экспери-

ментальных температур. Если приходится ограничиваться тремя экспериментальными температурами, то поточечный метод или линейная регрессия с 95%-ным уровнем достоверности скорости реакций будут давать для параметров Аррениуса более узкие диапазоны достоверности [70].

Кроме того, многократная линейная регрессия по соотношениям концентрация-температура относительно всех проверяемых температурных точек благодаря устранению необходимости оценивать отдельное  $A_0$  по каждому эксперименту и увеличению таким образом степеней свободы приводит к более точной оценке  $k$  при каждой температуре [36]. Поскольку после этого проводится линейная регрессия по соотношениям  $\ln k - 1/T$ , этот метод является также двухступенчатым, как и предыдущие.

Одноступенчатый метод требует проведения нелинейной регрессии указанного уравнения, что осуществляется подстановкой уравнений (9.19) или (9.23) в уравнения, указанные в табл. 9.1. Для моделей первого порядка, например, получаются следующие уравнения:

$$A = A_0 \exp \left[ -k_A t \exp \left( \frac{-E_A}{RT} \right) \right] \quad (9.25)$$

или

$$A = A_0 \exp \left\{ -k_{ref} t \exp \left( -\frac{E_A}{R} \left[ \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right] \right) \right\}. \quad (9.26)$$

Эти уравнения в качестве переменных имеют как время, так и температуру, а нелинейная регрессия дает одновременную оценку  $A_0$ ,  $k_A$  (или  $k_{ref}$ ) и  $E_A/R$  [1; 36]. Используются экспериментальные данные по концентрации относительно времени для всех проверяемых температур, существенно увеличивая степени свободы и получая более узкие доверительные интервалы для оцениваемых параметров.

Применение и статистические выгоды использования одноступенчатого метода для компьютерного моделирования данных, полученных при изучении кинетики реакций первого порядка, обуславливающих порчу пищевых продуктов были продемонстрированы в работе [36]. Для экспериментальных данных по неферментативному потемнению сухой сыворотки (модель нулевого порядка) и потери тиамина в промежуточной системе моделирования влажности (модель первого порядка) — в работе [23]. При этом методе оценка параметров Аррениуса делается на основании размеров соседнего доверительного интервала в 90%. Соседний доверительный интервал представляет собой эллипсоид, в котором истинные параметры существуют, по всей вероятности, совместно при определенном уровне достоверности. Крайние значения этой эллипсоидальной области с 90%-ным уровнем достоверности не соответствуют 95%-ным доверительным интервалам (полученным по  $t$ -тесту) для индивидуальных параметров. Поскольку опыт свидетельствует, что  $E_A \ln k_{ref}$  в высокой степени скоррелированы, указанный эллипсоид дает более точное представление об области достоверности [26].

Эту область достоверности можно построить, рассматривая дисперсию и ковариацию оценок параметров, предполагая, что эти оценки получены из двухмерного нор-

мального распределения. Контуры области достоверности для нелинейной регрессии образуют деформированный эллипсоид. Сложность его расчетов препятствует применению данного метода как рутинного статистического теста, однако соответствующие крайние точки области достоверности могут быть получены с помощью компьютерной программы [26], охватывающей аппроксимацию нелинейной регрессии

$$S = \left\{ 1 + \frac{N_p}{n - N_p} F[N_p, n - N_p, (1 - q)] \right\} SS, \quad (9.27)$$

где  $S$  — подставляемая нелинейная модель;  $SS$  — нелинейная оценка подставленной модели по методу наименьших квадратов, то есть  $SS = \sum (A_i - f)^2$  для  $i$  от 1 до  $n$ ;  $n$  — количество точек данных;  $N_p$  — количество параметров, полученных из нелинейных наименьших квадратов;  $100(1 - q)\%$  — уровень достоверности;  $F$  —  $F$ -статистика.

Этот метод позволяет получить надежные пределы достоверности определенных параметров, способных влиять на применение кинетических данных для определения сроков хранения и дизайна продукта, а также демонстрирует меры предосторожности, которые необходимы при сравнении кинетических данных. Основным недостатком здесь является сложность расчетов и создание специального программного обеспечения.

При большой разнице в рассчитанных интервалах достоверности для скоростей реакций при различных температурах эти различия могут быть включены в линейную регрессию соотношения  $\ln k$  и  $1/T$  при помощи взвешенного регрессионного анализа. В работе [1] для этого были предложены соответствующие весовые регрессионные коэффициенты. Был разработан весовой нелинейный метод наименьших квадратов, включающий взвешивание всех отдельных измерений концентрации [23], который требует большого увеличения количества расчетов, но было сделано заключение, что его применение не оправдано за исключением тех случаев, когда присутствует существенная асимметрия стандартизованных остатков, полученных по невзвешенному нелинейному методу наименьших квадратов.

Оценка параметров Аррениуса требует проведения кинетических экспериментов по крайней мере при трех температурах. Можно также провести один неизотермический эксперимент, в течение которого температура изменяется в соответствии с заранее определенной функцией  $T(t)$ , то есть как линейная функция. Из уравнений (9.9) и (9.19)

$$r_A = k_A \exp\left[\frac{-E_A}{R} \frac{1}{T(t)}\right] [A]^m \quad \text{или} \quad \ln r_A = \ln k_A + m \ln[A] - \frac{E_A}{R} \frac{1}{T(t)}. \quad (9.28)$$

Скорость  $r_A$  определяется методом дифференцирования, а параметры  $k_A$ ,  $m$  и  $E_A$  — многократной линейной регрессией. Обычно  $m$  равно нулю или единице. При втором подходе используется нелинейная регрессия интегрированной формы уравнения (9.28), равная для реакций первого порядка

$$A = A_0 \left[ -k_A \int_0^t \exp\left(\frac{-E_A}{R} \frac{1}{T(t)}\right) dt \right]. \quad (9.29)$$

Этот интеграл рассчитывается численно [93]. При неизотермическом подходе требуется очень хороший контроль температуры. При измерении концентрации допускаются только незначительные экспериментальные ошибки. В работе [147] было показано, что при статистической оценке требуется измерять большее число образцов до более высокой степени конверсии реагента, чем при изотермическом методе. Неизотермический метод очень чувствителен к экспериментальным ошибкам в определении концентрации. Даже при уровне точности в 2% одноэтапный изотермический метод с экспериментами при трех температурах дает более высокую точность в оценке параметров Аррениуса, чем неизотермический метод с линейно увеличивающейся температурой в том же диапазоне и для того же общего количества точек данных. Еще одним фактором (который обычно недооценивают) является неоднородность температуры внутри образца из-за изменений в теплопередаче, вызванных неодинаковой плотностью и встречающихся в ходе неизотермического эксперимента [66]. Неизотермический метод также не позволяет распознавать возможное отклонение данной реакции от «аррениусовского» поведения выше или ниже определенной температуры, что иногда встречается в пищевых продуктах.

Температурная зависимость в пищевой промышленности и в литературе по пищевой биохимии традиционно выражается как  $Q_{10}$  (соотношение констант скоростей реакции при температурах, отличающихся на  $10^\circ\text{C}$ ) или когда пищевой продукт хранится при температуре выше  $10^\circ\text{C}$ , как  $\theta_s$  (изменение срока хранения) [3]. В большей части старой литературы даются скорее данные по конечным точкам, чем полное кинетическое моделирование процессов потери качества. При подходе  $Q_{10}$  вводится по существу уравнение температурной зависимости в форме

$$k(T) = k_0 e^{bT} \quad \text{или} \quad \ln k = \ln k_0 + bT, \quad (9.30)$$

подразумевающее, что если на графике откладывается  $\ln k$  относительно температуры (вместо  $1/T$  в уравнении Аррениуса), получается прямая линия. Аналогично можно откладывать относительно температуры и  $\ln \theta_s$ . Такие графики часто называют графиками сроков хранения, где  $b$  — уклон графика срока хранения, а  $k_0$  — точка отсечения. Подобные *графики сроков хранения* представляют собой прямые линии только для узкого диапазона между  $10$  и  $20^\circ\text{C}$  [65]; для которого данные графика Аррениуса дадут на графике сроков хранения близкую к прямой линию, то есть  $Q_{10}$  и  $b$  являются функциями от температуры

$$\ln Q_{10} = 10b = \frac{E_A}{R} \frac{10}{T(T+10)}. \quad (9.31)$$

Изменение  $Q_{10}$  с температурой для реакций с различной энергией активации приведено в табл. 9.3.

Аналогично  $Q_{10}$  иногда используется термин  $Q_A$ . Определение  $Q_A$  — то же, что у  $Q_{10}$ , но  $10^\circ\text{C}$  заменяется на  $A^\circ\text{C}$ :

$$Q_A = Q_{10}^{A/10}. \quad (9.32)$$

Таблица 9.3. Зависимость  $Q_{10}$  от  $E_A$  и температуры

$E_A$ , кДж/моль	$Q_{10}$			Характер протекающих реакций
	При 4 °С	При 21 °С	При 35 °С	
50	2,13	1,96	1,85	Ферментативная, гидролитическая порча
100	4,54	3,84	3,41	Потеря питательных веществ, окисление липидов
150	9,66	7,52	6,30	Неферментативное потемнение

Для температурной зависимости кинетики инактивации микроорганизмов в процессе стерилизации и (иногда) при оценке ухудшения качества пищевых продуктов используется иной термин — значение  $z$  [37], которое представляет собой то температурное изменение, которое вызывает десятикратное изменение константы скорости данной реакции. Как и в случае  $Q_{10}$ ,  $z$  зависит от типовой (эталонной) температуры [106] и соотносится с  $b$  и  $E_A$  согласно следующему уравнению:

$$z = \frac{\ln 10}{b} = \frac{(\ln 10)RT^2}{E_A} \quad (9.33)$$

Другая форма функции  $k(T)$  была предложена в работе [59] в виде линейных, степенных и гиперболических уравнений, но в широком диапазоне температур уравнение Аррениуса дает корреляцию такую же или даже лучше.

В фармацевтической промышленности использовалось уравнение Эйринга (Eyring) [53]:

$$\ln k = \ln(k_B/h) + S/R - H/RT + \ln T, \quad (9.34)$$

где  $H$  — энтальпия активации;  $h$  — постоянная Планка;  $k_B$  — постоянная Больцмана;  $S$  — энтропия.

Уравнение Эйринга применялось для расчета компенсации энтальпия/энтропия в реакциях, протекающих в пищевых продуктах [63]. Примером подобного уравнения служит

$$k = k' T^n \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right), \quad (9.35)$$

где  $k'$  — предэкспоненциальный коэффициент;  $n$  — постоянная со значением от 0 до 1.

Был сделан вывод, что при температурах, существенных для переработки и хранения пищевых продуктов, этими терминами можно пренебречь.

Тем не менее существуют факторы, важные для реакций, протекающих при ухудшении качества пищевых продуктов, которые могут вызывать серьезные отклонения от типичного поведения, описанного Аррениусом [72]. Довольно часто встреча-

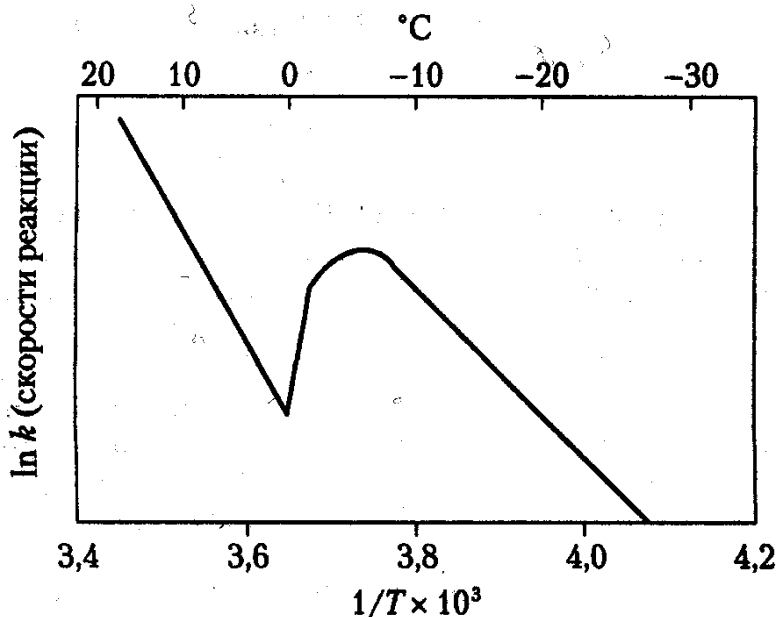


Рис. 9.3. Аномалии в «аррениусовском» поведении. Типичное влияние температур подмораживания на скорости реакций

ются фазовые изменения веществ. Жиры могут переходить в жидкое состояние, способствуя мобилизации органических реагентов и наоборот [134]. В замороженных пищевых продуктах эффект от фазовых превращений воды заметно выражен в диапазоне температур, свойственном для подмораживания. В общем случае в ходе замораживания при уменьшении температуры скорость реакции в неферментативных пищевых системах соответствует следующей модели: а) непосредственно ниже начальной точки замерзания скорость увеличивается (почти дискретно) до значений, несколько превышающих те, что были получены в переохлажденном состоянии при той же температуре; б) проходит через максимум; в) уменьшается при более низких температурах [30]. Схематически подобное поведение изображено на графике Аррениуса (рис. 9.3). Увеличение скорости особенно заметно для реагентов с низкой начальной концентрацией. Это увеличение скорости, вызванное замораживанием, связано в основном с эффектом концентрирования при замораживании и проявляется в температурной зоне формирования максимального количества льда. Размеры этой зоны зависят от типа пищевого продукта, но обычно составляют от  $-1$  до  $-10^{\circ}\text{C}$ . Обзор экспериментальных исследований данного воздействия отрицательных температур приводится в работе [122], а яркая демонстрация вышеописанной модели — в работе [103], где изучалась скорость реакции между миозином и малоновым диальдегидом в температурном диапазоне от  $45$  до  $-40^{\circ}\text{C}$ . Ферментативные реакции также отклоняются от «аррениусовского» поведения в зоне, близкой к зоне подмораживания.

Важны и другие явления, связанные с фазовыми переходами. Углеводы в аморфном состоянии при низких температурах могут кристаллизоваться, образуя больше свободной воды для других реакций, но уменьшая количество доступных сахаров [52]. Характерный пример этого — черствение хлеба [148], где наблюдается деградация амилопектина и перераспределение влаги между крахмалом и глютенном. Черствение демонстрирует эффект отрицательных температур между  $4$  и  $40^{\circ}\text{C}$ , достигая максимальной скорости при  $4^{\circ}\text{C}$ . Обзор многих работ по материалам с различной тек-

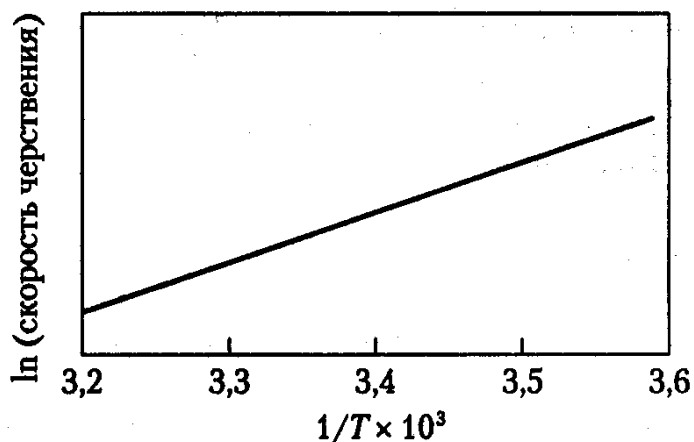


Рис. 9.4. Аномалии в «аррениусовском» поведении. Влияние температуры на скорость черствения хлеба

стурой сделан в работе [65]. Типичный график Арренуса для черствения хлеба приведен на рис. 9.4 со средним отрицательным  $E_A$  в  $-9$  ккал/моль.

В системах, где в определенном диапазоне температур наблюдаются существенные отклонения от поведения Аррениуса, проявляются переходные явления в линзах. Определенные условия производства или резкие изменения в условиях хранения (например, быстрое охлаждение и удаление растворителя) приводят к формированию метастабильных линз, особенно в углеводосодержащих пищевых продуктах [81, 83, 111]. Примерами подобных пищевых продуктов могут служить сухое молоко [14], леденцовая карамель [142], замороженные растворы [83], порошок молочной сыворотки и обезвоженные овощи [15].

Теория линзового перехода, применимая для аморфных полимеров, использовалась для пищевых полимеров и составов с небольшим молекулярным весом. Выше температуры линзового перехода  $T_g$  наблюдается резкое падение вязкости (примерно от  $10^{12}$  до  $10^3$  Па · с) [31] и существенное увеличение свободного объема, то есть пространства, которое не занято собственно цепочками полимера. Это проявляется в увеличении мобильности цепочки полимера и ускорении диффузии реагента. Зачастую зависимость скорости реакции пищевого продукта при переходе температуры через точку  $T_g$  не может быть описана одним уравнением Аррениуса. Изменение уклона (то есть энергии активации) наблюдается как  $T_g$ . Следовательно, в резиноподобном состоянии системы (выше  $T_g$ ) энергия активации может проявлять температурную зависимость, выражаемую как постепенно изменяющийся уклон графика Аррениуса. Вильямс, Ландель и Ферри ввели в 1955 г. уравнение *WLF* для эмпирического моделирования температурной зависимости механической и диэлектрической релаксации в резиноподобном состоянии. В работе [125] предложено использовать то же уравнение для описания температурной зависимости скорости химической реакции внутри аморфных матриц пищевого продукта при температурах выше  $T_g$ . В системах с контролируемой диффузией, где диффузия зависит от свободного объема, с помощью уравнения *WLF* константа скорости реакции может быть выражена как функция от температуры [120]:

$$\log \left( \frac{k_{ref}}{k} \right) = \frac{C_1(T_1 - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})}, \quad (9.36)$$



где  $k_{ref}$  — скорость, постоянная при эталонной температуре  $T_{ref}$  ( $T_{ref} > T_g$ );  $C_1$  и  $C_2$  — системнозависимые коэффициенты.

В работе [144] для  $T_{ref} = T_g$  с использованием экспериментальных данных средние значения этих коэффициентов были оценены как  $C_1 = -17,44$  и  $C_2 = 51,6$ . В различных исследованиях эти коэффициенты использовались в качестве универсальных значений для обоснования применимости *WLF*-уравнений для различных систем. Подобный подход может вводить в заблуждение [15, 31, 101], так как каждый раз для получения и использования системных специфических коэффициентов следует затрачивать некоторые усилия.

Иные подходы для оценки применимости *WLF*-модели и расчета значений  $C_1$  и  $C_2$  были проанализированы в работах [15] и [94]. Уравнение (9.36) может быть преобразовано в уравнение прямой, и таким образом график  $\left[ \log \frac{k_{ref}}{k} \right]^{-1}$  относительно  $\frac{1}{T - T_{ref}}$  представляет собой прямую линию с уклоном, равным  $C_2/C_1$  и отсечением на оси  $1/C_1$ . Если  $T_g$  известна, можно рассчитать константы при  $T_g$  [101]:

$$C_{1g} = \frac{C_1 C_2}{C_2 + T_g - T_{ref}} \quad \text{и} \quad C_{2g} = C_2 + T_g - T_{ref} \quad (9.37)$$

Эти значения можно сравнить с вышеупомянутыми средними *WLF*-коэффициентами.

Если  $T_g$  и скорость реакции известны при нескольких более высоких температурах,  $k_g$ ,  $C_1$  и  $C_2$  могут быть оценены по уравнению (9.36) при помощи методов нелинейной регрессии.

В работе [31] был предложен еще один подход для оценки *WLF*-уравнения и определения коэффициентов. Используется температура  $T_\infty$ , при которой скорость реакции практически равна нулю.  $T_\infty$  может быть аппроксимирована разностью между  $T_\infty$  и  $C_2$ , то есть  $T_\infty = T_{ref} - C_2$ . Преобразуя уравнение (9.36),

$$\log \left( \frac{k_{ref}}{k} \right) = \frac{C_1 (T - T_{ref})}{T - T_\infty}, \quad (9.38)$$

то есть если  $T_\infty$  выбрана правильно, график  $\lg(k/k_{ref})$  относительно  $(T - T_{ref})/(T - T_\infty)$  линеен и проходит через начало координат с уклоном, равным  $C_1$ . В качестве приемлемой начальной оценки  $T$  было предложено  $(T_g - 50)^\circ\text{C}$ . Данный подход был использован в работе [15] для проверки применимости уравнения *WLF* при моделировании влияния температуры на скорость неферментативного потемнения у некоторых обезвоженных пищевых продуктов и в модельных системах углеводов. Рассчитанные значения коэффициентов уравнения *WLF* для различных систем при заданной эталонной температуре и значениях  $T_g$  при различном содержании влаги приведены в табл. 9.4.

В некоторых более поздних публикациях обсуждается проблема относительной валидности уравнений Аррениуса и *WLF* для резиноподобного состояния систем в

Таблица 9.4. Значения коэффициентов уравнения WLF для различных пищевых продуктов и модельных систем

Система	$T_{\infty}$	$T_{ref}$ , °C	$T_g$ , °C	Содержание влаги, г $H_2O$ /г твердого вещества	$C_1$	$C_2$	$C_{1g}$	$C_{2g}$
Яблоки	$T_g - 50$	55	22	0,014	8,79	83	14,59	50
			2	0,022	8,79	103	18,05	50
			-7	0,050	8,79	112	19,69	50
			-13	0,087	8,70	118	20,73	50
			-24	0,011	8,79	129	22,68	50
Капуста кочанная	$T_g - 50$	45	-38	0,017	8,79	143	25,14	50
			15	0,014	7,82	80	12,5	50
			5	0,021	7,82	90	14,07	50
			1	0,032	7,82	94	14,7	50
			-8	0,056	7,82	103	16,1	50
Морковь	$T_g - 50$	43	-29	0,089	7,82	115	17,98	50
			-26	0,117	7,82	121	18,92	50
			-58	0,179	7,82	153	23,93	50
			-5	0,054	7,44	98	14,58	50
			-20	0,062	7,44	103	15,33	50
Обезжиренное сухое молоко	$T_g - 100$	90	-15	0,080	7,44	108	16,07	50
			101	0,000	8,1	89	7,2	100
			65	0,012	8,1	125	10,14	100
			44	0,059	8,1	146	11,83	100
			50	0,030	6,8	140	9,52	100
Обезжиренное сухое молоко	$T_g - 100$	90	45	0,040	6,8	145	9,86	100
			40	0,050	6,8	150	10,2	100
			-8	0,056	8,8	88	15,9	50
			-20	0,089	8,8	100	18,1	50
			-58	0,189	8,8	138	24,5	50
Картофель	$T_g - 65$	50	30	0,049	7,92	85	10,4	65
			20	0,094	7,92	95	11,6	65
			-5	0,150	7,92	120	14,6	65
			-15	0,200	7,92	130	15,84	65
			29	0,059	8,4	106	9,0	100
Сухая молочная сыворожка	$T_g - 100$	35	18	0,080	8,4	117	9,9	100
Модельная система 1 <sup>а</sup>	$T_g - 90$	45	45	0,059	8,3	90	8,3	90
Модельная система 1 <sup>б</sup>	$T_g - 10$	55	40	0,073	6,93	135	7,8	120

Примечание: WLF — Уильямс, Ландель, Ферри (Williams, Landel, Ferry). Данные приведены при эталонной температуре ( $C_1$  и  $C_2$ ) и преобразованы так, чтобы соответствовать  $T_{ref} = T_g(C_{1g}$  и  $C_{2g})$ . <sup>а</sup> Состав: 99% — поливинил пирролидон, 0,5% — глюкоза, 0,5% — глицин; <sup>б</sup> состав: 98% — поливинил пирролидон, 1,0% — ксилит, 0,5% — лизин. По [15].

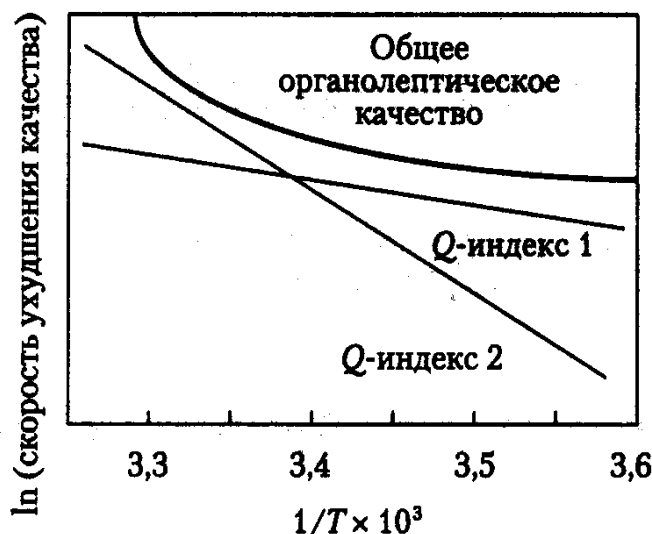


Рис. 9.5. Типичная температурная зависимость ухудшения качества, когда реакции с различными  $E_A$  влияют на общие органолептические показатели

диапазоне температур от 10 до 100 °С выше  $T_g$ . Эта проблема вполне вероятно может возникать из-за излишнего упрощения [49]. Как уже указывалось выше, процессы, влияющие на качество пищевого продукта и зависящие от изменений вязкости (то есть кристаллизация, текстурные изменения), удовлетворяют модели WLF. Тем не менее химические реакции могут быть и кинетически зависимыми, когда  $k \ll \alpha D$  (где  $D$  — коэффициент диффузии, а  $\alpha$  — постоянная, не зависящая от  $T$ ), и диффузионно зависимыми (когда  $k \gg \alpha D$ ), и зависимыми одновременно и от кинетики, и от диффузии, когда  $k$  и  $\alpha D$  — величины равного порядка. В последнем случае эффек-

тивная постоянная скорости реакции может быть выражена как  $\frac{k}{1 + k/\alpha D}$ . В большинстве случаев  $k$  представляет температурную зависимость аррениусовского типа, а  $D$  во многих работах представлена или как следствие уравнения Аррениуса с изменением уклона графика при  $T_g$ , или как следствие уравнения WLF для резиноподобного состояния, особенно в диапазоне температур от 10 до 100 °С выше  $T_g$ . Значение отношения  $k/\alpha D$  выражает относительное влияние  $k$  и  $D$  и определяет, можно ли успешно моделировать реакцию порчи: а) посредством одного уравнения Аррениуса для всего температурного диапазона; б) посредством уравнения Аррениуса с изломом уклона при  $T_g$  с практически постоянным уклоном выше  $T_g$  или в) с изменяющимся уклоном, где для диапазона от 10 до 100 °С выше  $T_g$  используется уравнение WLF. В комплексных системах, где наблюдается много фаз и этапов реакции, соответствие уравнения Аррениуса той или иной модели следует рассматривать как эмпирическую формулу для практического использования, а не как уравнение, объясняющее данный механизм или явление.

Когда для оценки качества пищевого продукта важны несколько реакций с различными  $E_A$ , может случиться так, что каждая из них оказывает доминирующее влияние на качество системы в своем температурном диапазоне. Так, например, если качество измеряется общей суммой баллов по вкусоароматическим свойствам, график скорости изменения качества относительно  $1/T$  будет иметь различный уклон в каждом из этих диапазонов (схематически это представлено на рис. 9.5). Типичным

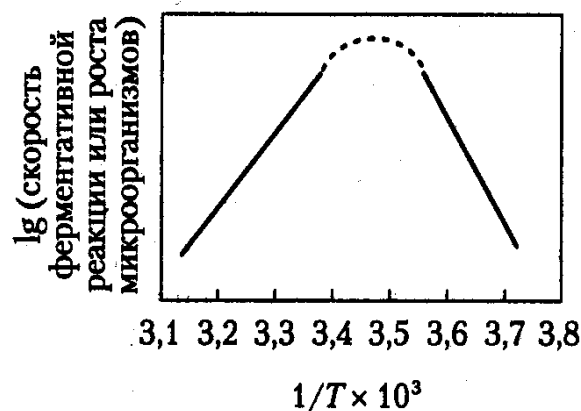


Рис. 9.6. Типичная кривая температурной зависимости ферментативной реакции или роста микроорганизмов

примером подобного поведения является ухудшение качества обезвоженного картофеля, когда окисление липидов и потеря растворимых в жирах витаминов доминирует в температурном диапазоне до 31 °С, а неферментативное потемнение и потеря лизина — после 31 °С [65].

Поведение белков при довольно высоких температурах, характеризующее их денатурацией и, следовательно, увеличением и уменьшением их подверженности химическим реакциям, зависит от стереохимических факторов, влияющих на эти реакции, что является еще одним фактором, приводящим к «неаррениусовскому» поведению. Для реакций, включающих ферментативную активность или рост микроорганизмов, график температурной зависимости имеет максимум при некоторой оптимальной температуре, выше или ниже которой наблюдается поведение «аррениусовского» типа (рис. 9.6).

В последнее время популярны исследования в области изучения температурной зависимости роста микроорганизмов. Описанные выше кинетические принципы были применены к сбору необходимых данных для моделирования роста микроорганизмов в рамках междисциплинарной дисциплины, называемой «прогностическая микробиология» [12, 87, 88]. Для температурного диапазона, лежащего ниже температуры оптимального роста, любое из двух простых уравнений (Аррениуса и квадратнокорневое) успешно моделируют эту зависимость для всех практических целей. Квадратнокорневая модель с двумя параметрами, предложенная в работе [107], имеет форму

$$\sqrt{k} = b(T - T_{\min}), \quad (9.39)$$

где  $k$  — скорость роста;  $b$  — уклон нисходящей линии, выражающей отношение  $\sqrt{k}$  к температуре;  $T_{\min}$  — гипотетическая температура роста, когда нисходящая линия пересекает ось  $T$  при  $\sqrt{k} = 0$ .

$Q_{10}$  и данное выражения связаны как

$$Q_{10} = \left( \frac{T - T_{\min} + 10}{T - T_{\min}} \right)^2. \quad (9.40)$$

Известны также уравнения для моделирования роста микроорганизмов во всем биокинетическом диапазоне с большим числом параметров, и они основаны как на квадратнокорневой модели [108], так и на уравнении Аррениуса [91, 124]. Экспериментальное подтверждение этих уравнений представлено в работе [149].

Традиционно математические модели, связывающие количество микроорганизмов с температурой, делят на две основные группы [143]: работы, описывающие развитие или рост микроорганизмов при относительно низких температурах, и работы касательно термического разрушения микроорганизмов в «летальном» диапазоне температур. Не так давно был предложен [102] комбинированный подход, где использовалась единственная формула для описания константы скорости как развития, так и разрушения во всем температурном диапазоне (от роста ( $k(T) > 0$ ) до летальности). Основная область применения подобной модели — это расчет изменений, имеющих место в некотором температурном диапазоне, где наблюдается переход от развития микроорганизмов к их гибели.

И наконец, температура может оказывать косвенный дополнительный эффект путем воздействия на другие факторы, сказывающиеся на реакциях, которые мы обсудим в следующем разделе. Рост температуры увеличивает активность воды при том же общем уровне содержания влаги или увеличивает влагообмен с окружающей средой в случаях проницаемой упаковки, что влияет на скорость реакции. На реакции, зависящие от уровня кислотности, могут дополнительно влиять изменения температуры, поскольку во многих жидких средах уровень pH является функцией температуры [3]. Растворимость газов, особенно кислорода, меняется с температурой (растворимость кислорода в воде — на 25% через каждые 10 °C), что влияет на реакции окисления при ограниченном количестве кислорода.

#### 9.2.2.2 Влияние прочих факторов окружающей среды

К наиболее важным  $E_j$ -факторам, влияющим на скорость реакций, которые приводят к порче пищевых продуктов, помимо температуры относятся содержание влаги и активность воды  $a_w$ . Активность воды характеризует связанность содержащейся в продукте воды и ее готовность выступать в качестве растворителя и участвовать в химических реакциях [64].

Можно распознать критические уровни  $a_w$ , выше которых наблюдается нежелательное ухудшение свойств продукта. Контроль  $a_w$  является основой для сохранения сухих продуктов и продуктов с промежуточным содержанием влаги (*IMF, intermediate moisture foods*). Для различных видов микроорганизмов могут быть определены минимальные значения  $a_w$ . Например, наиболее толерантная патогенная бактерия *Staphylococcus aureus* может расти при низких  $a_w$  (от 0,85 до 0,86). Эти цифры часто принимают в качестве критического уровня патогенности пищевых продуктов. Минимальные значения  $a_w$  для большого количества типичных микроорганизмов приведены в работе [10].

Содержание влаги и водная активность влияют также на качество текстуры. Сухие, хрустящие пищевые продукты (например, чипсы, крекеры) с увеличением содержания влаги свыше 0,35–0,5  $a_w$  становятся практически непригодными к употреблению [51]. Сушеные фрукты (аналогичные продуктам с промежуточным содержанием влаги), хлебобулочные и кондитерские изделия с уменьшением содержания влаги

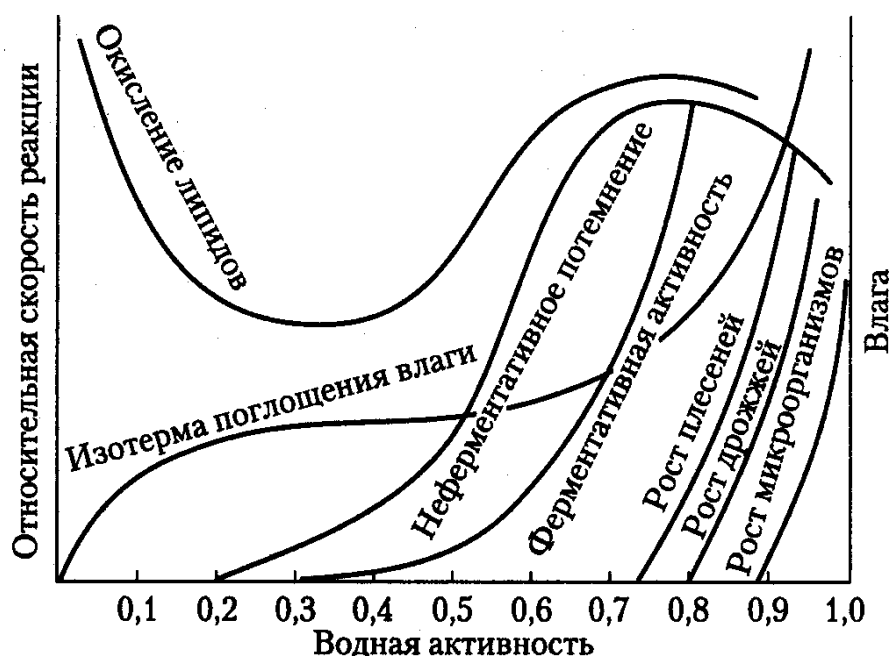


Рис. 9.7. Карта общей стабильности пищевого продукта (по [79])

ниже 0,5–0,7  $a_w$  становятся непригодными из-за их избыточной жесткости [55]. Кроме того, как уже говорилось выше, на текстуру и скорость реакций, ухудшающих качество продукта, влияют явления рекристаллизации сухих аморфных сахаров, вызываемые достижением  $a_w$  величины 0,35–0,4.

Помимо специфических критических пределов  $a_w$ , водная активность существенно влияет на химические реакции. Этот факт играет большую роль при хранении пищевых продуктов с промежуточным уровнем содержания влаги и сухих продуктов. Обычно способность воды выступать в качестве растворителя, среды для реакций и реагента увеличивается с ростом  $a_w$ . В результате скорость многих реакции порчи с ростом  $a_w$  увеличивается экспоненциально и достигает значений, превышающих те, что соответствуют влаге мономолекулярного слоя. Схематически это явление можно представить в виде карты общей стабильности пищевого продукта (рис. 9.7).

На этом рисунке можно видеть критические пределы  $a_w$  для роста микроорганизмов и относительные скорости реакций, важных для сохранения пищевого продукта, — окисления липидов и неферментативного потемнения. Причины, лежащие в основе такого поведения, были предметом многих исследований (например, [130]). Большинство реакций обладает минимальной скоростью вплоть до значения, характерного для мономолекулярного слоя. Окисление липидов отличается той особенностью, что оно минимально в пределах значений мономолекулярного слоя  $m_o$  и увеличивается до и после этого значения [61, 74].

Теории, предложенные для объяснения влияния  $a_w$  на реакции порчи продукта, а также для систематизации и моделирования этого влияния, рассмотрены в работе [64]. Содержание влаги и  $a_w$  могут влиять на кинетические параметры ( $k_A$ ,  $E_A$ ), на концентрацию реагентов и, в некоторых случаях, на кажущийся порядок реакций  $n$ . В большинстве исследований моделировали или  $k_A$  как функцию  $a_w$  [64] относительно изменения мобильности реагентов из-за  $a_w$ -зависимых изменений вязкости, или  $E_A$  как функцию от  $a_w$  [89, 90]. Обратная зависимость между  $E_A$  и  $a_w$  (увеличение  $a_w$  влечет уменьшение  $E_A$  и наоборот) может быть теоретически объяснена предложен-

ным явлением компенсации энтальпии–энтропии. Применимость данной теории и данные в ее поддержку рассмотрены в работе [63].

Кроме того, содержание влаги и  $a_w$  непосредственно влияют на  $T_g$  данной системы. Как было изложено в предыдущем разделе, изменение  $T_g$  и переход в резиноподобное состояние имеет выраженные проявления, особенно в текстуре и явлениях, зависящих от вязкости, а также в скорости реакций и их зависимости от температуры. Что касается дегидратированных систем, было предложено, что соотношение критическое содержание влаги/ $a_w$ , альтернативное значению мономолекулярного слоя, согласно теории BET, является значением, при котором данная дегидратированная система имеет  $T_g$ , равное 25 °C [110]. Анализ этих критических значений способствует объяснению текстурных изменений, встречающихся при различных  $a_w$  и температурах окружающей среды (то есть потери «хруста» у закусок — выше 0,3–0,5  $a_w$  или недопустимая жесткость у продуктов с промежуточным содержанием влаги — ниже 0,7–0,5  $a_w$ ), однако их практическая значимость не столь очевидна, и их нельзя рассматривать изолированно. В работе [95] рассмотрены случаи, когда не находит своего подтверждения фундаментальное предположение о том, что скорости реакций в продукте, находящемся в резиноподобном состоянии, намного выше, чем в «стабильном» ломком состоянии. В комплексных системах пористость матрицы, размер молекул и подобные коллапсу и кристаллизации явления, встречающиеся в резиноподобном состоянии, дают в результате более сложное поведение этих систем. В объяснение взаимосвязи между содержанием влаги и скоростью реакций, вызывающих порчу продукта, вносят свой вклад и показатель активности воды, и теория изменения хрупкости твердых продуктов. Тем не менее следует особо отметить, что в отличие от четко определенной изотермы влажности, то есть соотношения между содержанием влаги и  $a_w$ , точное определение  $T_g$  как функции от содержания влаги в реальной системе пищевого продукта представляет собой довольно трудную задачу, для решения которой еще предстоит приложить много усилий. Отсюда следует, что при экстраполивании имеющихся знаний по пищевой безопасности необходимо проявлять осторожность. Водная активность, применяемая в качестве показателя микробиологической стабильности, является обоснованным и практичным инструментом в контексте «барьерных» технологий. Дополнительные критерии, относящиеся к  $T_g$ , следует рассматривать лишь после их тщательной экспериментальной оценки [21].

Математические модели, учитывающие в качестве дополнительного параметра  $a_w$ , могут быть использованы для предсказания сроков хранения пищевых продуктов, чувствительных к влажности [17, 89, 92]. Подобные прогностические расчеты можно применять к пищевым продуктам в упаковке, где модели переноса влажности были разработаны с учетом свойств продукта и упаковочных материалов [129]. Кроме того, в нормальных условиях для предсказания сроков хранения применялись ускоренные методы проверки сроков хранения (ASLT, *accelerated shelf-life testing*), основывающиеся на данных, полученных при высокой температуре и высокой влажности [90].

Еще одним определяющим фактором является pH пищевой системы. Влияние кислотности на различные микробиологические, ферментативные и белковые реакции изучалось при моделировании биохимических или пищевых систем. Деятель-

ность микроорганизмов и ферментов находится в некотором оптимальном диапазоне рН, ниже и выше которого эта активность уменьшается, что очень напоминает реакцию на температуру (см. рис. 9.6). Функциональность и растворимость белков существенно зависит от рН, причем эта растворимость обычно бывает минимальной вблизи изоэлектрической точки [18], непосредственно влияя на поведение белков в ходе реакций.

Основными примерами реакций, скорость которых зависит от кислотности среды, являются неферментативное потемнение и разложение аспартама. Неферментативное потемнение белков достигает минимума при рН = 3 или 4 [42], а ускоряется вблизи нейтрально-щелочного диапазона [28, 29]. Разложение аспартама минимально при рН = 4,5 [42], хотя существенный эффект дают буферная способность системы и присутствие специфических ионов [138]. К сожалению, в очень небольшом числе работ рассматривается зависимость рН от других факторов, например, температуры. В этих работах [4, 5, 140] показана важность подобных исследований и информации о них для расчета и оптимизации реальных систем. Довольно большой прогресс в прояснении и моделировании комбинированного влияния на рост микроорганизмов таких факторов, как  $T$ , рН,  $a_w$  или концентрации соли, был достигнут в рамках прогностической микробиологии [113, 114].

На многие реакции, ухудшающие качество, влияет и газовый состав. Кислород влияет как на скорость, так и на кажущийся порядок реакций окисления — в зависимости от того, в избытке он присутствует или его не хватает [60]. Исключение или ограничение присутствия кислорода путем азотной промывки или вакуумной упаковки уменьшает окислительно-восстановительный потенциал и замедляет нежелательные реакции. Кроме того, присутствие и соотношение других газов, особенно диоксида углерода, вторичного этилена и СО, существенно влияет на биологические и микробиологические процессы в свежем мясе, фруктах и овощах. Способ действия СО<sub>2</sub> частично связан с поверхностным окислением [99], однако при этом срабатывают и дополнительные механизмы, еще не до конца проясненные. Моделирование влияния температуры на рост микроорганизмов до сих пор является предметом исследований [145]. Различные системы для достижения максимального продления сроков хранения требуют разных соотношений О<sub>2</sub>:СО<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>. Зачастую избыток двуокиси углерода может нанести вред продукту, и наоборот, изучается хранение при пониженном давлении (при уменьшении общего давления). Подробный обзор технологических процессов упаковки в регулируемой и модифицируемой газовой среде (САР/МАР) приведен в работах [46 и 68], а в работе [77] рассмотрены попытки кинетического моделирования систем САР/МАР.

В настоящее время проводятся эксперименты по сверхвысоким давлениям (от 1000 до 10 000 атм). Такое гидростатическое давление, приложенное через передающую давление среду, действует без временной задержки и не зависит от размеров и геометрической формы продукта. Оно может быть эффективно при использовании невысоких температур [44]. Основные воздействия технологии высокого давления сводятся к следующим:

- инаktivация микроорганизмов;
- модификация биополимеров (денатурация белков, инаktivация или активация ферментов, разложение);



- улучшение функциональности продукта (например, плотности, снижение температуры замораживания, изменения текстуры);
- улучшение качества (например, цвета и аромата).

Исследований по кинетике изменений, происходящих при технологической обработке под высоким давлением, и их влияния на сроки хранения пищевых продуктов пока еще очень немного, и для применения подобных технологий в полном объеме необходимо дальнейшее изучение данной проблемы.

Для выражения вышеизложенных способов влияния различных факторов в простой математической форме можно использовать понятие качественной функции в более общем смысле. Предполагая, что качество данного пищевого продукта зависит от  $i$  различных количественно оцениваемых режимов ухудшения качества (качественных факторов)  $A_i$ , соответствующая качественная функция может быть выражена аналогично уравнению (9.14):

$$Q_i(A_i) = k_i t. \quad (9.41)$$

Постоянная скорости  $k_i$  каждого режима ухудшения качества является функцией вышеуказанных факторов, а именно:

$$k_i = f_i(T, a_w, pH, P_{O_2}, P_{CO_2}, \dots), \quad (9.42)$$

значения которых зависят от времени

$$Q_i(A_i) = k_i t. \quad (9.41)$$

Постоянная скорости  $k_i$  каждого режима ухудшения качества — функция вышеуказанных факторов, а именно:

$$k_i = f_i(T, a_w, pH, P_{O_2}, P_{CO_2}, \dots), \quad (9.42)$$

значения которых зависят от времени

$$T = T(t), a_w = a_w(t), pH = pH(t), P_{O_2} = P_{O_2}(t), P_{CO_2} = P_{CO_2}(t). \quad (9.43)$$

Функции уравнения (9.42) включают в себя влияние условий хранения, способа упаковки, упаковочных материалов и биологическую активность данной системы. Таким образом, для различных условий постоянная скорости является общей функцией времени, то есть  $k_i = k_i(t)$ . В этом случае значение качественной функции в некоторое определенное время задается выражением

$$Q_i(A_i) = \int_0^t k_i dt. \quad (9.44)$$

Если самое низкое из возможных значений качественного параметра  $A_i$ , обозначаемое как  $A_m$ , известно, то во время  $t$  поглощенная «доля качества»  $\Phi_{ci}$  и остающаяся «доля качества»  $\Phi_{ri}$  определяются как

$$\Phi_{ci} = \frac{Q_i(A_i) - Q_i(A_0)}{Q_i(A_m) - Q_i(A_i)}; \quad (9.45)$$

$$\Phi_{ri} = \frac{Q_i(A_m) - Q_i(A_i)}{Q_i(A_m) - Q_i(A_0)}. \quad (9.46)$$

Знание значений  $\Phi_{ri}$  для различных режимов порчи позволяет рассчитать оставшийся срок хранения данного пищевого продукта  $\theta_r$  из выражения

$$\theta_r = \min[\Phi_{ri}/k_i], \quad (9.47)$$

где постоянные скорости  $k_i$  рассчитываются для предполагаемого набора «остальных» постоянных условий.

Изложенный анализ устанавливает основы для прогнозирования сроков хранения некоторой сложной системы при изменяющихся условиях. Основными задачами подобной схемы являются распознавание основных режимов порчи, определение соответствующих качественных функций и оценка уравнения (9.42), то есть влияния различных факторов на постоянную скорости. Последнее представляет собой довольно сложную задачу для реальных пищевых систем. Большинство современных исследований касаются влияния температуры и различных температурных условий при выраженном (или подразумеваемомся) предположении, что другие факторы являются постоянными. Для верификации аррениусовской модели, полученной в результате нескольких экспериментов относительно сроков хранения при постоянной температуре, можно применять контролируемые температурные функции наподобие прямоугольных, синусоидальных и линейных (пиковых) колебаний температуры. В работе [66] дается аналитическое выражение для уравнения (9.44) при вышеприведенных температурных функциях с использованием подхода  $Q_{10}$ . Сходные решения можно получить при использовании аррениусовской или квадратно-квадратичной моделей.

Для выработки системного подхода к влиянию различных температурных условий может быть введено понятие «эффективной температуры»  $T_{eff}$  — это некоторая постоянная температура, приводящая к тем же качественным изменениям, что и распределение различных температур за тот же период времени.  $T_{eff}$  является характеристикой распределения температур и кинетическим параметром данной системы. Постоянная скорости при  $T_{eff}$  обусловлена эффективной постоянной скорости, и  $Q_i(A_i)$  из уравнения (9.44) равно  $k_{eff}t$ . Если  $T_m$  и  $k_m$  — средние от температурного распределения, отношение  $\Gamma$  также является характеристикой температурного распределения и специфичным для данной системы, где

$$\Gamma = \frac{k_{eff}}{k_m}. \quad (9.48)$$

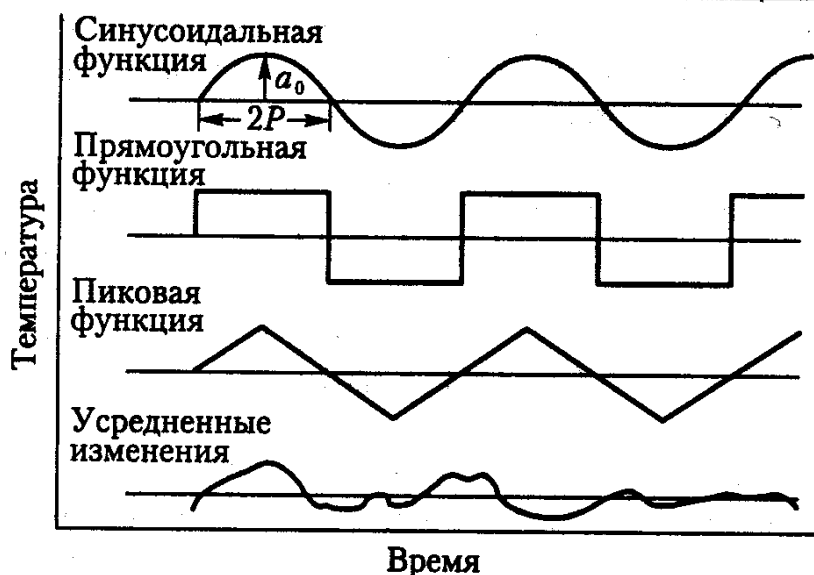


Рис. 9.8. Характерные распределения флуктуации температур, используемые для верификации валидности кинетических моделей:  $a_0$  — амплитуда синусоидальной, прямоугольной и пиковой волновых функций

Таблица 9.5. Аналитические выражения для расчета  $\Gamma$  при различных температурных функциях

Функция	Подход $Q_{10}$	Аррениусовский подход
Синусоидальная	$\Gamma = I_0(a_0 b)$	$\Gamma \approx I_0 \left[ \frac{E_a a_0}{RT_m (T_m + a_0)} \right]$
Прямоугольная	$\Gamma = \frac{1}{2} [e^{a_0 b} + e^{-a_0 b}]$	$\Gamma = \frac{1}{2} \exp \left[ \frac{E_A a_0}{RT_m (T_m + a_0)} \right] + \frac{1}{2} \exp \left[ \frac{-E_A a_0}{RT_m (T_m - a_0)} \right]$
Линейная	$\Gamma = \frac{e^{a_0 b} - e^{-a_0 b}}{2 a_0 b}$	$\Gamma = \frac{\exp \left[ \frac{E_A a_0}{RT_m (T_m + a_0)} \right] - \exp \left[ \frac{-E_A a_0}{RT_m (T_m - a_0)} \right]}{2 \frac{E_A a_0}{RT_m (T_m + a_0)}}$
Усредненная	$\Gamma = \frac{\sum_{j=0}^n e^{b T_j} \Delta t_j}{e^{b T_m}}$	$\Gamma = \frac{\sum_{j=0}^n \exp \left( \frac{-E_A}{RT_j} \right) \Delta t_j}{\exp \left( \frac{-E_A}{RT_m} \right)}$

Примечание:  $I_0(x)$  — модифицированная функция Бесселя (*Bessel*) нулевого порядка. Ее значения можно рассчитать по сумме бесконечного числового ряда  $I_0(x) = 1 + \frac{x^2}{2^2} + \frac{x^4}{2^2 4^2} + \frac{x^6}{2^2 4^2 6^2} + \dots$ , или найти в математических справочниках (например, [139]).

Для некоторых известных характерных температурных функций, приведенных на рис. 9.8, аналитические выражения в подходе  $Q_{10}$  и аррениусовской модели даны в табл. 9.5.

Эффективная константа скорости данной реакции —  $k_{eff}$  температура  $T_{eff}$  а также значения качественных функций для конкретного режима порчи рассчитываются по  $\Gamma$  от распределения различных температур. Полная валидизация разработанной кинетической модели — это сравнение значения  $\Gamma$  с экспериментально полученным значением качества (для различных температурных функций, покрывающих диапазон температур, представляющих практический интерес). Подобная методология была применена для различных систем реакций в пищевых продуктах и затем оценена на предмет их согласования или расхождения с прогнозировавшимся кинетическим поведением в работах [9, 47, 76, 109, 118, 113].

Помимо этого, воздействие различного температурного распределения может быть выражено через эквивалентное время  $t_{eq}$ , которое определяется как время, при котором некоторая эталонная температура приводит к тем же изменениям качества (то есть к тому же значению качественной функции), что и данная переменная температура. Практическая ценность  $t_{eq}$  заключается в том, что если время, при котором избранная  $T_{ref}$  является предполагаемой поддерживаемой температурой (например, для охлажденных продуктов — 4 °C), то оно непосредственно определяет срок хранения при этой температуре. Следует отметить, что если средней температурой выбирается данная эталонная температура ( $T_{ref} = T_m$ ), то  $t_{eq}/t = \Gamma$ .

Здесь необходимо сделать краткое замечание об эквивалентном точечном методе. Такой подход использовался для оценки и моделирования термических процессов [97], а также реакции (ТТ) [33]. Аналогичная методика могла бы применяться для оценки ухудшения качества в течение срока хранения пищевых продуктов. Применяя качественную функцию

$$Q(A) = k_A \left[ \exp \left( -\frac{E_A}{RT} \right) \right] t, \quad (9.49)$$

если при этом  $Y = Q(A)/k_A$ , то вышеприведенное уравнение можно записать как

$$\ln Y = \frac{-1}{RT} E_A + \ln t, \quad (9.50)$$

то есть график  $\ln Y$  относительно  $E_A$  для различных пищевых продуктов дает прямую линию.

Для конкретного переменного температурно-временного распределения предлагается, что уникальная точка ( $T_e, t_e$ ) определяется по величине угла наклона и точке пересечения оси ординат линии, описываемой уравнением (9.50). Это позволяет рассчитать изменение качества некоторой пищевой системы с известным  $E_A$  по измеренным экспериментально изменениям по крайней мере двух других пищевых систем (или ТТ), находящихся в тех же температурно-временных условиях. Подобный подход может иметь место не только для изотермических условий [85].

## 9.3 Применение кинетических методов для прогнозирования и контроля сроков хранения пищевых продуктов

### 9.3.1 Ускоренные методы оценки сроков хранения

Принимая во внимание вышеописанные ограничения и возможные источники отклонения, уравнение Аррениуса может быть положено в основу для моделирования процессов порчи пищевых продуктов в некотором диапазоне температур. Такая модель может быть использована для прогнозирования скоростей реакций и сроков хранения данного пищевого продукта при любой температуре в пределах этого диапазона. Что немаловажно, она позволяет использовать понятие ускоренных методов оценки сроков хранения (УМОСХ — *ASLT, accelerated shelf-life testing*).

УМОСХ подразумевают экспериментальное применение для ускорения процессов порчи и проверки сроков хранения высоких опытных температур с последующей экстраполяцией полученных результатов на обычные условия хранения путем использования уравнения Аррениуса. Это существенно сокращает время проверки. Реакция со средней  $E_A$  в 90 кДж/моль может быть ускорена в 9–13 раз при увеличении температуры в ходе тестирования на 20 °С (в зависимости от выбранной температурной зоны). Таким образом, эксперимент, который мог бы занять год, проводится в течение примерно месяца. Данный принцип и методы эффективного проведения УМОСХ описаны в работах [67, 73], а также в публикации Института пищевых продуктов, Великобритании (*Institute of Food Science and Technology, UK*) [45].

Проектирование испытаний по установлению сроков хранения представляет собой комплексное мероприятие, требующее достаточного знания всех дисциплин, связанных с пищевыми продуктами (в частности, пищевой инженерии, пищевой химии, микробиологии пищевых продуктов, аналитической химии, физической химии, химии полимеров), и основных стандартов и норм. Процедура УМОСХ сводится к следующим этапам:

1. *Определение факторов микробиологической безопасности для данного пищевого продукта и технологического процесса.* Использование принципов метода контроля качества по критическим контрольным точкам желательно еще с этапа производства. Если основные потенциальные проблемы возникают уже на этой стадии (например, существуют такие критические контрольные точки, которые трудно контролировать), то должны быть изменены или рецептура продукта, или технология его изготовления.
2. *Определение путем тщательного анализа компонентов данного пищевого продукта, технологического процесса его изготовления, а также планируемых условий хранения, био-, физико-химические реакции,* которые существенно влияют на сроки годности и могут поэтому служить в качестве индикаторов ухудшения качества. Для выполнения данного этапа необходимы хорошие знания технологии, опыт работы и умение проводить информационный поиск. Если при подобном анализе окажется (без проведения специального тестирования), что требуемые сроки хранения не могут быть достигнуты из-за

существенного снижения качества продукта, необходимы изменения рецептуры, технологии и режима хранения.

3. *Выбор упаковки для проведения испытаний по срокам хранения.* Замороженные, охлажденные и консервированные (в жестяных банках) продукты должны быть упакованы в реальную использующуюся на производстве упаковку. Высушенные продукты могут храниться в герметически закрытой стеклянной таре или воздухонепроницаемых пакетах при установленных для данного продукта содержании влаги и  $a_w$ .
4. *Определение температуры при экспериментальном хранении* (в качестве справочного руководства можно использовать нижеприведенную таблицу).

Тип продукта	Экспериментальная температура	Рекомендуемые температуры хранения
	°C	
Консервированный	25, 30, 35, 40	4
Обезвоженный (дегидратированный)	25, 30, 35, 40, 45	18
Охлажденный	5, 10, 15, 20	0
Замороженный	-5, -10, -15	<-40

5. *Расчет продолжительности испытаний для каждой выбранной температуры по предполагаемому сроку хранения в ожидаемых условиях хранения и температурах обращения с продуктом на базе доступной информации по наиболее вероятным  $Q_{10}$ .* Если по ожидаемым значениям  $Q_{10}$  информации нет, необходимо использовать как минимум три экспериментальных температуры.
6. *Определение типа и частоты проверок (тестов), которые необходимо провести при каждой температуре.* Формула для выявления минимальной частоты тестирования при всех температурах основана на протоколе испытаний при самой высокой температуре

$$f_2 = f_1 Q_{10}^{\Delta T / 10}, \quad (9.51)$$

где  $f_1$  — интервал времени между тестами (например, дни или недели) при самой высокой экспериментальной температуре  $T_1$  в градусах Цельсия;  $f_2$  — интервал времени между тестами (например, дни или недели) при любой более низкой экспериментальной температуре выдерживается  $T_2$  (в градусах Цельсия);  $\Delta T$  — разница между  $T_1$  и  $T_2$ .

Таким образом, если некоторый консервированный продукт содержится при температуре 40 °C и проверяется раз в месяц, а затем при 35 °C (то есть  $\Delta T = 5$ ), и  $Q_{10}$  равна 3, то этот продукт следует тестировать по крайней мере каждые 1,73 месяца. Обычно рекомендуют проводить тестирование чаще, особенно в тех случаях, когда  $Q_{10}$  точно не известно. Применение слишком длительных

интервалов времени может привести к неточному определению сроков хранения и обесцениванию результатов испытаний. При любых условиях хранения для минимизации статистических ошибок необходимы как минимум шесть точек данных — в противном случае существенно уменьшается статистическая достоверность полученных значений сроков хранения.

7. *Нанесение на график собранных данных для определения порядка реакций и принятия решения относительно изменения частоты испытаний.* Обычно до окончания испытаний информацию не анализируют, хотя общепризнано, что ранние изменения протокола испытаний существенно увеличивают надежность получаемых результатов.
8. *Определение порядка и скорости реакций по всем вариантам хранения, составление соответствующего графика Аррениуса и прогнозирование сроков хранения при желаемых реальных условиях.* Для определения сроков годности и проверки валидности прогноза продукт может также храниться при окончательных условиях, хотя на производстве это, как правило, не применяется из-за временных и финансовых издержек. Эффективнее провести тестирование полученной прогностической модели путем проведения дополнительного теста при контролируемой переменной температуре. Результаты сравниваются с прогнозными значениями согласно табл. 9.5.

Дополнительным параметром, который может быть использован для прогнозирования сроков хранения пищевых продуктов, чувствительных к содержанию влаги, являются математические модели, учитывающие влияние  $a_w$ . Такие прогнозы могут быть применены к упакованным продуктам с учетом моделей переноса влаги, разработанных на основе свойств данного пищевого продукта и упаковочных материалов [129]. Для прогнозирования сроков хранения при нормальных условиях используются также методы УМОСХ, основанные на сборе данных при высокой температуре и в условиях высокой влажности [90]. В работе [140] был предложен новый подход к УМОСХ, когда для ускорения тестирования сроков хранения рассматриваются не только внешние условия, но и концентрация отдельных реагентов или катализаторов. Когда это выполнимо, достигается большая экономия времени ввиду сокращения продолжительности испытаний.

### 9.3.2 Применение температурно-временных индикаторов для мониторинга сроков хранения

В общем случае ТВИ могут быть определены как простые недорогие устройства, регистрирующие легко измеряемые, зависящие от времени и температуры изменения, отражающие (полно или частично) «температурную историю» некоторого (пищевого) продукта. Работа ТВИ основана на механических, химических, ферментативных или микробиологических свойствах системы, которые необратимо изменяются с момента их активации. Скорость изменения зависит от температуры и увеличивается при ее повышении — примерно так, как это происходит для большинства физико-химических процессов. Это изменение обычно регистрируется как аналитический сигнал в форме механической деформации, развития или изменения цвета. Это по-

звояет получить некоторую информацию о предшествующих условиях хранения. Способность ТВИ функционировать в качестве датчиков, накапливающих информацию о «температурной истории» с момента их активации до момента снятия показаний по каждому изменяемому свойству расширяет возможности их применения.

ТВИ могут использоваться для мониторинга температурного воздействия на индивидуальную упаковку пищевых продуктов, на коробки или паллеты в процессе их сбыта вплоть до времени их реализации. При использовании таких индикаторов получают сведения о наблюдавшихся температурных условиях в каждой перевалочной точке, и эти точки обычно служат в качестве центров сбора информации и принятия решений. Собранная со всех подобных центров информация может быть использована для общего контроля системы сбыта, позволяя таким образом распознавать и при необходимости исправлять наиболее проблемные зоны сбыта.

Вторая возможность использования ТВИ — это их применение в качестве мониторов качества. Поскольку ухудшение качества является функцией «температурной истории», а ТВИ эту историю «измеряют», их реакция может быть сопоставлена с уровнем качества данного пищевого продукта. Если это достигнуто, то ТВИ могут применяться любым из описанных ниже способов (или обоими сразу). Первый — в качестве инструмента управления запасами и оборотом товаров на складе на уровне розничной торговли. Данный подход в настоящее время применяется в рамках системы *FIFO* («первый поступил — первый вышел», *first in — first out*), по которой продукты, поступившие первыми и/или со скорым окончанием сроков годности на этикетке, выкладываются и продаются в первую очередь. Этот подход нацелен на жесткое требование, по которому все продукты продавались с одним и тем же уровнем качества. Предполагается, что вся партия продукта находится в одинаковых условиях хранения, и поэтому уровень качества — в основном функция времени. Применение таких индикаторов помогает внедрить систему контроля, которая не будет зависеть от нереалистичных предположений. Цель же по-прежнему состоит в выполнении жесткого требования, суть которого состоит в том, что продукты с ближайшим окончанием срока годности продаются в первую очередь (это требование иногда обозначают *LSFO* «*least shelf-life first out*», «продукт с ближайшим сроком годности должен продаваться первым») [75]. Система *LSFO* теоретически (что не подтверждено) может сократить количество возврата продуктов и уменьшить недовольство потребителя, так как доля поступающих в розничную продажу продуктов неудовлетворительного качества будет резко сокращена.

Во-вторых, ТВИ, прикрепленные к индивидуальным упаковкам продукта, могут служить своего рода «динамичной» или «активной» этикеткой срока годности при хранении, вместо этикетирования с открытой датой (или наряду с ним). ТВИ могли бы убедить потребителя в том, что условия хранения данного пищевого продукта не были нарушены. Таким образом, конечной целью применения ТВИ является защита прав потребителя.

Принципы действия различных ТВИ основаны на различных физико-химических способах детектирования, которые описаны в работах [26, 133]. О статистической корреляции работы ТВИ с характеристиками качества для скоропортящихся и замороженных пищевых продуктов сообщается в работах [20, 136, 141]. Общая методология, позволяющая скоррелировать сигнал ТВИ с изменениями качества пи-



Таблица 9.6. Данные имитационного моделирования неферментативного потемнения как функции температуры хранения

Время, дни	Неферментативное потемнение, $OD/g$ СВ для температур, °C			
	25	35	45	55
1			0,102	0,111
2				0,121
3				0,131
4				0,139
5	0,103	0,104	0,110	0,152
8				0,177
9				0,190
10			0,124	
11				0,238
15			0,137	
20	0,101	0,112	0,148	
25			0,158	
30	0,101	0,114	0,169	
40		0,123	0,194	
50		0,127	0,244	
60	0,106	0,133		
90	0,107	0,148		
105		0,155		
120	0,110			
135		0,160		
150	0,114			
180		0,175		
200	0,117			
275	0,127			
350	0,130			

По [115], выборочно.

щевых продуктов (при известных режимах его ухудшения) без реального одновременного тестирования данного индикатора и данного пищевого продукта, была разработана Тауокисом и Лабуза [130]. При помощи уравнения Аррениуса были математически промоделированы три типа имеющихся в продаже ТВИ. Один тип основан на зависимости от времени и температуры диффузии красящего вещества в тканевом тампоне, второй — на изменении цвета контролируемой ферментативной реакции, а третий — на развитии цвета в результате полимеризации. Была разработана схема, позволяющая скоррелировать реакцию ТВИ  $X$  с показателем качества  $A$  данного пищевого продукта.  $X$  может быть выражена в виде

$$F(X)_t = kt = k_I \exp(-E_A/RT)t,$$

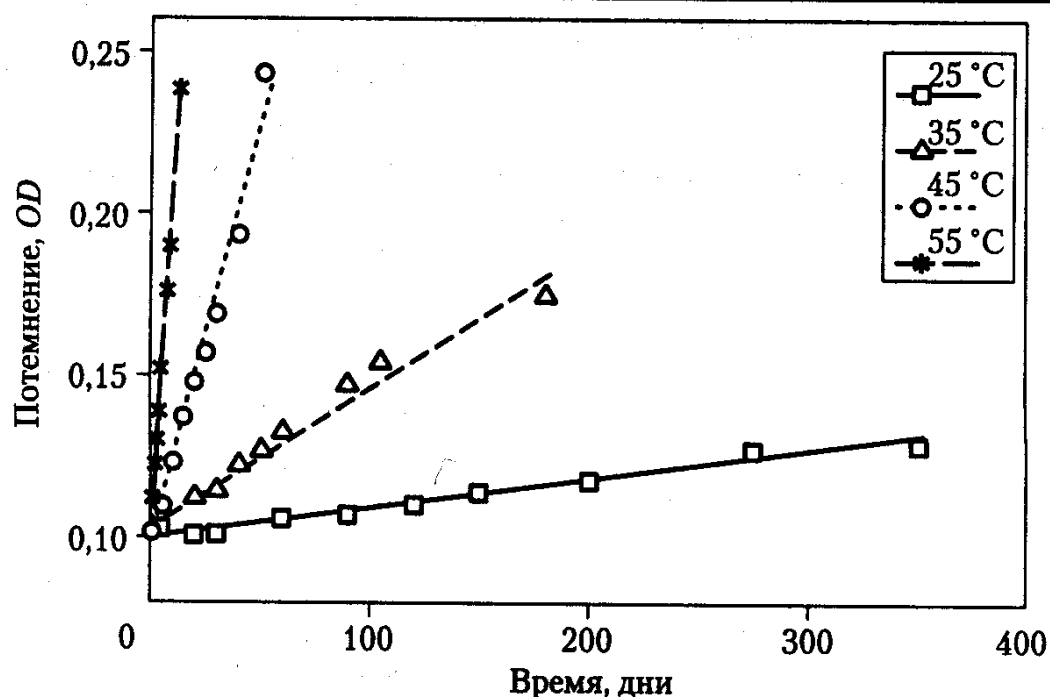


Рис. 9.9. Неферментативное потемнение некоторой моделируемой системы как функция температуры при хранении (реакция нулевого порядка)

где  $F(X)$  является функцией реакции ТВИ;  $t$  — время;  $k$  — постоянная скорости реакции ТВИ; постоянная  $k_1$  и энергия активации  $E_A$  — параметры Аррениуса.

Для ТВИ, находящегося в том же распределении температур  $T(t)$ , что и контролируемый пищевой продукт, значение  $F(X)_t$  получается из реакции  $X$ ;  $T_{eff}$  в этом случае можно рассчитать по уравнению (9.52) при  $T = T_{eff}$ . Значение  $T_{eff}$  и кинетических параметров ухудшения качества данного пищевого продукта позволяет провести оценку  $Q(A)$  и, следовательно, оценить ухудшение качества продукта. Была также проведена оценка надежности ТВИ при различных температурных условиях [131] с использованием аналитических выражений, приведенных в табл. 9.5. В общем эта оценка была положительной.

## 9.4 Примеры использования кинетического моделирования

### 9.4.1 Кинетические расчеты

Два приведенных ниже примера основаны на системах имитационного моделирования [115], описывающих реакцию неферментативного потемнения (табл. 9.6, рис. 9.9.) и сохранение тиамина (табл. 9.7, рис. 9.10). Данные были получены исходя из предположения, что для учета реальных экспериментальных условий и возможности ошибки были введены значения энергии активации  $E_A/R$ , постоянная скорости, определенная при эталонной температуре  $k_{ref}$ , и начальная концентрация  $A_0$ . Следует отметить, что в обоих примерах эталонная температура  $T_{ref}$  равна 300 К. Как уже отмечалось выше, подобная трансформация важна для улучшения стабильности в ходе численного интегрирования и для оценки нелинейных параметров. Такая

Таблица 9.7. Данные имитационного моделирования удерживания тиамин в некоторой системе как функция температуры хранения

Время, дни	Концентрация тиамин, мг/г СВ для температур, °C		
	25	45	55
1		96,7	93,40
2			85,47
5	98,22	89,44	69,92
8		80,98	47,50
10	0,103	0,110	0,152
12			42,29
15		72,36	33,43
20	98,16	66,72	
25		59,91	14,80
30	94,80	51,93	
40		44,11	
60	92,56	28,62	
90	88,61		
120	85,84		
150	81,27		
197	76,29		
257	70,55		
300	67,15		

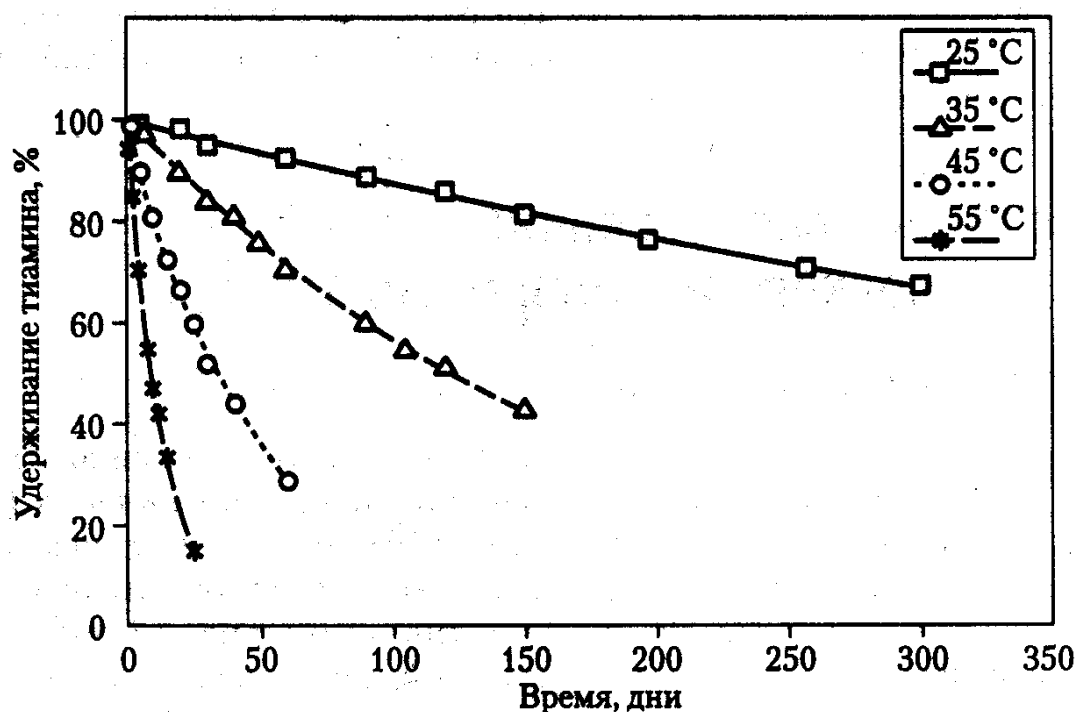


Рис. 9.10. Удержание тиамин в некоторой моделируемой системе как функция температуры при хранении (реакция первого порядка)

трансформация рекомендуется также потому, что эти параметры существенно линейны и нелегко провести их непосредственную регрессию [23, 36, 93].

Для получения коэффициентов регрессии и проведения анализа были применены компьютерные программы для линейных и нелинейных процессов *BMDPIR* и *BMDPAR* [25].

1. Для оценки параметров Аррениуса наиболее широко распространен *двухстадийный метод*, который представляет собой классический метод последовательной подстановки методом наименьших квадратов. Первая стадия — это регрессия качественной функции (см. табл. 9.1; то есть  $A_0$  для реакций нулевого порядка, или  $\ln A_t/A_0$  для реакций первого порядка) относительно времени при каждой температуре для оценки константы скорости  $k$  и начальной концентрации  $A_0$ . Оценка  $A_0$  помогает избежать отклонений в таком определении и обеспечивает дополнительный критерий адекватности этой модели экспериментальным данным. Существенное расхождение между данными, полученными в результате подобной оценки, и экспериментальными свидетельствует о наличии некоторой проблемы. Эта проблема может возникать из-за неадекватности собственно кинетической модели, большой экспериментальной ошибки, недостаточного количества данных и т. п. Вторая стадия — это проведение регрессии  $\ln k$  относительно  $(1/T - 1/T_{ref})$  для получения оцениваемых  $k_{ref}$  и  $E_A/R$ .
2. *Нелинейный метод наименьших квадратов* (одностадийный). Нелинейная регрессия представляет собой единственную регрессию для всех данных точек ( $i = 1, \dots, n$ ), для оценки  $E_A/R$ ,  $k_{ref}$  и  $A_0$  без расчета скоростей при каждой температуре.
3. *Результаты*. Аррениусовские параметры и начальная концентрация, полученные путем использования двух методов регрессии, сведены в табл. 9.8 (по неферментативному потемнению (реакция нулевого порядка) и содержанию тиамина (реакция первого порядка)). Результаты свидетельствуют об отсутствии существенных расхождений полученных значений  $E_A/R$  и  $k_{ref}$  при использовании методов 1 и 2. Тем не менее значения, полученные методом 2, ближе к действительным значениям, использовавшимся для имитирования (моделирования).
4. *Уровень достоверности*. Как уже отмечалось выше, уровень достоверности для  $E_A/R$  и  $k_{ref}$  может быть выведен с помощью компьютерной программы ([26]), осуществляющей аппроксимацию для нелинейной регрессии из уравнения (9.27). Значения, использовавшиеся для вывода уровня достоверности нелинейной регрессии по данным, касающимся неферментативного потемнения, приведены ниже.

$$E_A/R = 15, \quad K_{ref} = 0,122, \quad A_0 = 0,97,$$

откуда

$$SS = 1,331 \cdot 10^{-3}, \quad \text{а} \quad F(3,34, 90\%) = 2,27.$$

Подставляемая модель  $F$  из уравнения (9.27) заменяется на соответствующую модель, базирующуюся на порядке данной реакции.

Таблица 9.8. Влияние метода регрессии на аррениусовские параметры, полученные для неферментативного потемнения (реакция нулевого порядка) и удержания тиамин (реакция первого порядка)

Метод регрессии	$df^a$	$K \times 100^b$				$E_A/R$	$K_{ref}^b$	$A_0^r$				$A_{0avr}^d$
		25 °C	35 °C	45 °C	55 °C			25 °C	35 °C	45 °C	55 °C	
Неферментативное потемнение												
						15 000	0,135					0,100
Двухстадий- ный	1	9,1	41,6	270,2	1157,9	16 067	0,117	0,100	0,105	0,095	0,098	0,098
Нелинейный	19	—	—	—	—	15 796	0,122	—	—	—	—	0,099
Удерживание тиамина												
						13 000	0,00178					100,0
Двухстадий- ный	2	0,133	0,580	2,065	7,588	13 125	0,00175	99,7	100,4	99,2	101,5	100,2
Нелинейный	16	—	—	—	—	12 985	0,00182	—	—	—	—	99,8

<sup>a</sup> Степени свободы;

<sup>b</sup> константа скорости реакции:  $OD/(г \cdot л)$  или  $(день)^{-1}$  для реакций нулевого или первого порядка соответственно;

<sup>c</sup> единицы  $k_{ref}$  при 300 К такие же, как и в <sup>b</sup>;

<sup>r</sup> полученная начальная концентрация:  $OD/г$  или  $мг/г$  тиамин для реакций нулевого и первого порядка соответственно;

<sup>d</sup> среднее значение от полученных начальных концентраций. Единицы такие же как и в <sup>r</sup>.

#### Реакция нулевого порядка

$$f = A_0 \pm tk_{ref} \exp \left[ -\frac{E_A}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right]. \quad (9.53)$$

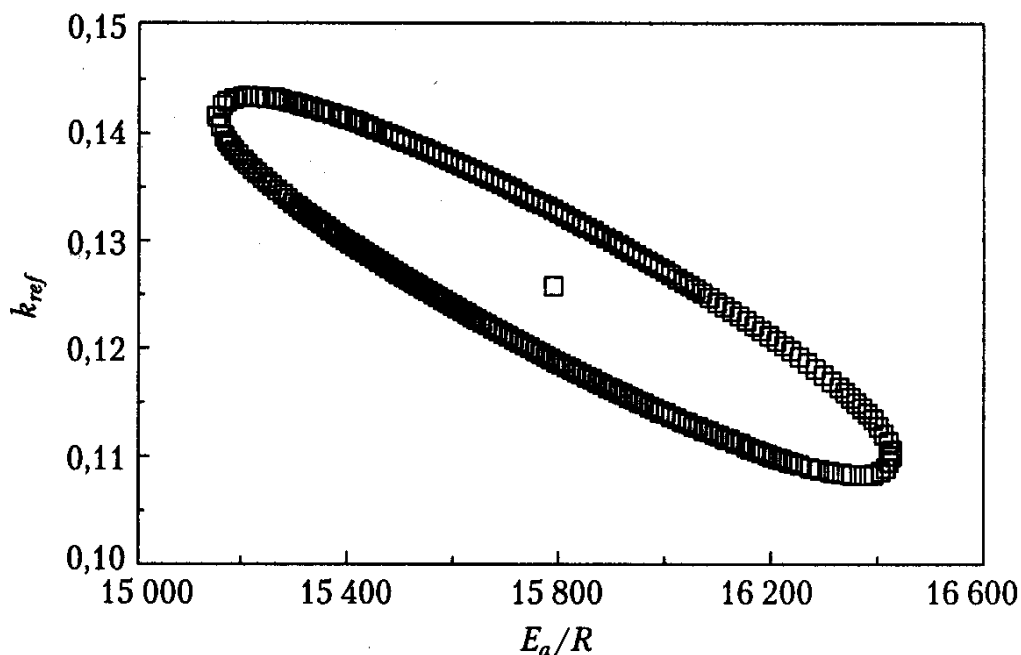
#### Реакция первого порядка

$$f = \exp \left\{ \ln(A_0) \pm tk_{ref} \exp \left[ -\frac{E_A}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \right\}. \quad (9.54)$$

#### Реакция $n$ -го порядка

$$f = \left\{ A_0^{(n-1)} \pm (1-n)tk_{ref} \exp \left[ -\frac{E_A}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \right\}^{(1/(1-n))}. \quad (9.55)$$

В вышеприведенных уравнениях вместо знака  $\pm$  следует вставить нужный знак. Для реакций, где концентрация увеличивается, должен присутствовать знак «плюс», а для реакций с уменьшением концентрации — знак «минус».



**Рис. 9.11.** Объединенная область достоверности (90%) для  $E_A/R$  и  $k_{ref}$  полученная одностадийным нелинейным методом наименьших квадратов для процесса неферментативного потемнения

Для получения области достоверности применяется следующий алгоритм:

1. Предполагается, что начальная концентрация постоянна. В этом случае применяется оценочное значение, полученное методом нелинейной регрессии.
2. Область достоверности получается путем выбора тех значений  $E_A/R$  и  $k_{ref}$ , которые удовлетворяют равенству, выраженному уравнением 9.27. Очевидно, что значения  $E_A/R$  и  $k_{ref}$  варьируются в диапазоне, который удовлетворяет неравенству,

$$\text{заложенному в уравнение (9.27), то есть } S \leq \left\{ 1 + \frac{N_p}{n - N_p} F[N_p, n - N_p, (1 - q)] \right\} SS.$$

Этот метод проб и ошибок обычно реализуется на компьютере.

Полученная область достоверности схематически приведена на рис. 9.11, где замечен интервал между рассчитанными значениями  $E_A/R$  и  $k_{ref}$ . При сравнении областей достоверности, полученных двумя методами регрессии, оказывается, что нелинейная регрессия дает обычно меньшую область достоверности, что означает лучшую оценку прогноза сроков годности и возможность имитационного моделирования [23, 36].

## 9.4.2 Примеры моделирования сроков годности пищевых продуктов при хранении

Вышеприведенные примеры кинетического расчета показывают, насколько взвешенно следует использовать кинетические параметры, полученные в ходе экспериментов по проверке сроков годности. На практике в большинстве случаев применяется двухстадийный метод — благодаря его простоте и убедительности. Результаты следует понимать в качестве средних значений с достаточно большими пределами до-

стоверности и соответственно так их и использовать. Тем не менее информация, полученная по результатам хорошо продуманных экспериментов по определению сроков годности при трех и более различных температурах, обычно бывает достаточной для разработки вполне удовлетворительных прогностических моделей сроков годности при хранении. Кроме того, применение принципов УМОСХ и кинетического моделирования проиллюстрируем двумя примерами — во-первых, примером стерилизованного ароматизированного молочного напитка, подслащенного аспартамом, что может служить образцом непосредственного применения этих принципов, поскольку качественная функция данного пищевого продукта определяется доминирующим, количественно определяемым показателем качества, а именно аспартамом. И напротив, второй пример — это комплексная пищевая система с многими различающимися режимами ухудшения качества, что требует для эффективной проверки сроков хранения междисциплинарного подхода и глубоких знаний данной системы.

#### 9.4.2.1 Шоколадный напиток, подслащенный аспартамом

Этот пример из практики базируется на экспериментальных данных, приведенных в работах [6, 7]. Исследования проводились в целях оценки стабильности аспартама в стерилизованных напитках из снятого молока различного состава. Рынок подобных напитков постоянно растет благодаря их питательным свойствам, низкокалорийности и свойствам аспартама как высокоинтенсивного подсластителя (без противоречий, свойственных сахарину), в связи с чем аспартам становится весьма желательным ингредиентом. Тем не менее при кислотном показателе молока (6.6) скорость разложения аспартама довольно высока, что существенно сокращает срок годности продукта при хранении (по органолептическим показателям). Количественный анализ и моделирование поведения этого доминирующего показателя качества позволили бы оптимизировать рецептуру данного продукта и продолжительность сроков годности при хранении, а также, возможно, незначительно изменить pH. В связи с этим изучались (в целях исследования разложения аспартама) различные продукты из стерилизованного снятого молока, подслащенные 200 ppm (частями на миллион) и слегка забуферированные цитратами или фосфатами до pH от 6,38 до 6,67. Образцы хранились при 5 температурах от 0 до 30 °C, и тройные образцы анализировались посредством высокоэффективной жидкостной хроматографии (HPLC, ВЭЖХ) при соответствующих временных интервалах (основанных на уравнении 9.51) и значении  $Q_{10}$ , равном 4. Результаты этих экспериментов (при pH = 6,67 и содержании цитрата, равном 0,008 M) приведены в табл. 9.9.

На рис. 9.12,а концентрация аспартама (АРМ или А) изображена в виде графика относительно времени при вышеуказанных 5 температурах. Наилучшее линейное совпадение  $Q(A) = kt$  было получено для  $Q(A) = \ln(A/A_0)$ , то есть для кинетики первого порядка (см. рис. 9.12,б). Все измерения подвергались статистическому анализу (без усреднения по трем образцам по каждому времени) для увеличения степеней свободы. Рассчитанные константы скорости и 95%-ный доверительный интервал приведены в табл. 9.10.

Для определения параметров Аррениуса  $-k$  откладывается на логарифмической шкале относительно обратного значения абсолютной температуры (или  $\ln(-k)$  от-

Таблица 9.9. Разложение аспартама в стерилизованной молочной системе при pH = 6,67

Продолжительность, ч	Концентрация аспартама, ppm при температуре, °C				
	30	20	10	4	0
10	181				
10	175				
10	182				
23	168	186			
23	166	172			
23	171	181			
38	130				
38	127				
38	141				
48	120	152			
48	101	160			
48	108	162			
78		172			
78		154			
78		153			
95			175		
95			173		
95			175		
121			168	189	198
121			168	180	195
121			167	186	194
143		164			
143		129			
143		150			
262		63	140	165	
262		73	134	165	
262		94	160	167	
455			114	132	159
455			96	117	152
455			118	121	155
599			93	110	136
599			87	104	136
599			91	88	134
694				80	130
694				95	119
694				86	113
767					115
767					109
767					103



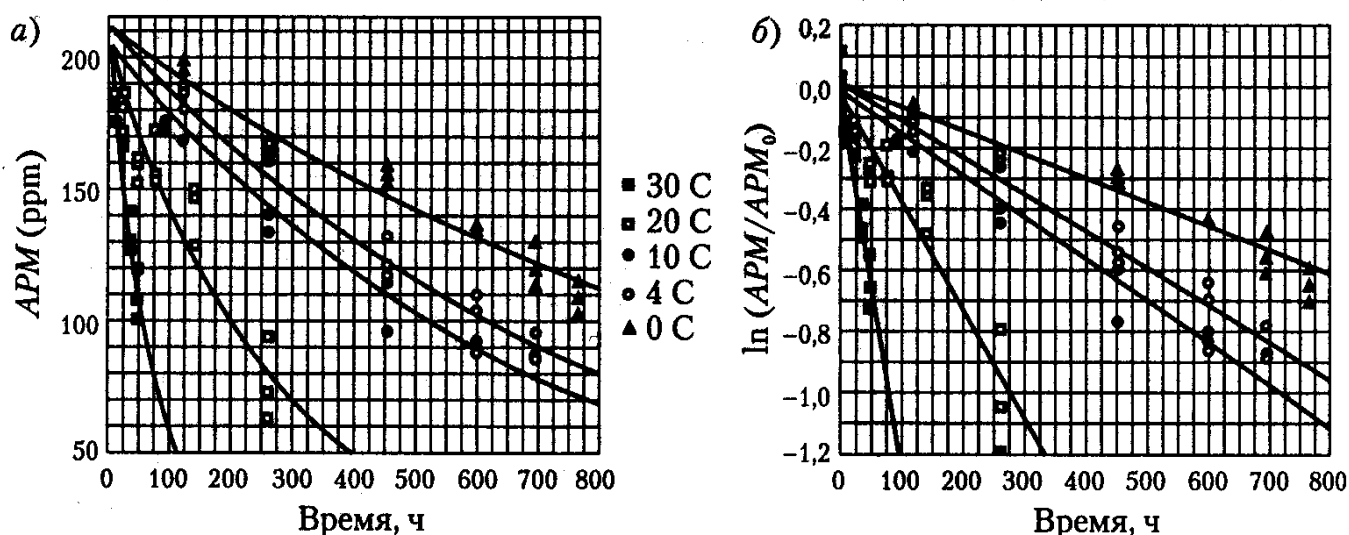


Рис. 9.12. Графики разложения аспартама и  $Q(A)$  относительно времени при 5 температурах для молочной системы с pH 6,67

Таблица 9.10. Константы реакции разложения аспартама с доверительным интервалом при пяти температурах

Постоянная скорости	30 °C	20 °C	10 °C	4 °C	0 °C
$-k$ (ч <sup>-1</sup> )	0,0125	0,00356	0,00138	0,00121	0,000790
95% Д. И.	0,0013	0,00046	+0,00010	0,00009	0,000062

носительно  $1/T$ ). Для увеличения степеней свободы и получения более узких доверительных интервалов рассчитываемых параметров включен доверительный интервал для  $k$  в 95%. График Аррениуса (рис. 9.13) дает путем линейной регрессии значения  $k_A = 3,163 \cdot 10^8$  ч<sup>-1</sup> и энергии активации  $E_A = 14,560$  кал/моль. Коэффициент детерминации  $R^2$  равен 0,952, доверительный интервал 95% — 1,830 кал/моль.

Полученная кинетическая информация позволяет спрогнозировать разложение аспартама и, следовательно, срок годности продукта при хранении в любом температурном режиме. Таким образом, если предполагается, что в продукт внесли аспартам во время 0, то продолжительность сохранения приемлемой сладости (до того момента, как подсластитель наполовину деградирует), то есть срок годности при хранении при 4 °C, составляет примерно 4 недели (670 ч). Сроки годности могут быть рассчитаны для любой известной температуры хранения. Например, предполагается, что пастеризованный (асептический) молочный продукт в течение 10 дней хранится при температурных условиях, показанных на рис. 9.14, что представляет собой неспецифическое распределение со средней температурой  $T_m$ , равной 7,1 °C. Полное разложение аспартама в конце этих 10 дней может быть рассчитано путем интегрирования. Значение соотношения  $\Gamma$  (уравнение (9.48) и табл. 9.5 для средней  $T$ ) получается равным 1,0437. При  $T_m$  после 10 дней содержание аспартама составляет 71,7%. Таким образом, действительный уровень аспартама равен 68,7%. Эти данные затем переводятся в оставшийся срок годности при хранении при постоянной температуре в 4 °C, равный 307 ч (12,8 дней) (уравнения 9.46 и 9.47). Заметим, что если предполагается

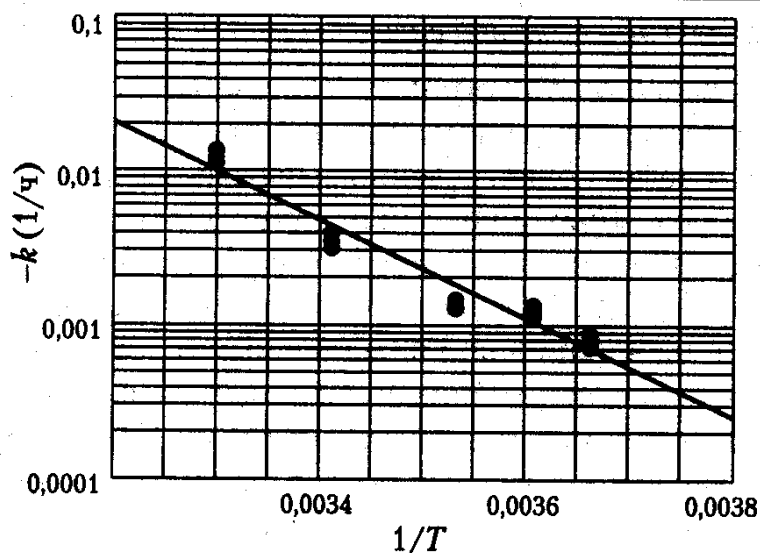


Рис. 9.13. График Аррениуса для разложения аспартама в молочной системе с кислотностью 6,67

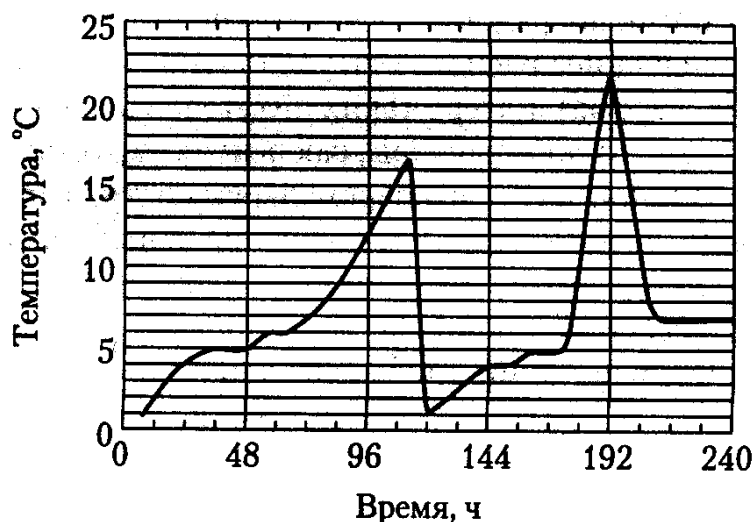


Рис. 9.14. Изменяющиеся температурные условия хранения подслащенного аспартамом продукта в течение первых 10 дней

хранение продукта в первые 10 дней при 4 °C, то остаточный срок годности при хранении составит 18 дней.

Практическая ценность вышеописанного анализа состоит в том, что он позволяет системно подходить к прогнозированию сроков годности при хранении и оптимизировать их. Сходные результаты получаются и при других исследованных уровнях кислотности, где энергия активации варьируется от 14 до 18 ккал/моль, а срок годности при хранении достигает 60 дней при нижнем конце диапазона кислотности в 6,38. Это служит ярким свидетельством того, как данный подход может способствовать увеличению сроков годности некоторого продукта еще в ходе его разработки. Следует отметить, что хотя эксперименты проводились при низких температурах, удовлетворительная согласованность с аррениусовскими данными показывает, что другие рецептуры можно исследовать лишь при высоких температурах, причем по методике УМОСХ время проверки снижается до 200 ч.

#### 9.4.2.2 Пример комплексной пищевой системы

Предыдущий пример хорошо иллюстрирует системный подход к прогнозированию сроков годности при хранении тех пищевых продуктов, для которых можно получить доминирующие и легко количественно выражаемые качественные показатели. В многокомпонентных сложных пищевых продуктах ситуация может оказаться намного сложнее (относительно возможности получения количественных данных). Тем не менее внимательный подход к оценке всех возможных способов ухудшения качества с учетом важности их влияния при планируемых условиях и наличия методов их измерения, а также протокола испытаний, базирующегося на принципах, изложенных в настоящем разделе, может помочь решить эту проблему. Примером пищевой системы, где требуется именно такой комплексный подход, является замороженная пицца. Все аспекты, влияющие на качество данного продукта, были изложены в работах [67, 73]. К показателям, которые нуждаются в мониторинге химических изменений в пицце при холодильном хранении, относятся: общее содержание свободных жирных кислот и специфических летучих свободных жирных кислот (определяемое методом газовой хроматографии — ГХ), пероксиды, окислительные летучие вещества (например, гексанал) — также посредством ГХ, летучие вещества специй (посредством ГХ), лизин, цвет (уменьшение красного или увеличение коричневого); органолептические свойства: вкус и аромат, потеря таких питательных веществ, как витамины А и С. Следует рассмотреть и такие факторы, как потеря «хруста», ухудшение качества сыра (его «функциональности») и его перемалываемости, а также рост кристаллов льда внутри упаковки. И, наконец, не следует пренебрегать микробиологическим контролем, особенно при решении различного рода конфликтных ситуаций.

Более подробные сведения о роли рассмотренных в данном разделе факторов и возможных протоколах испытаний приведены в прилагаемом списке литературы.

## Литература

1. Arabshahi, A. 1982. Effect and interaction of environmental and composition variables on the stability of thiamin in intermediate moisture model systems, Ph. D. Thesis, University of Wisconsin, Madison, Wisconsin.
2. Arabshahi, A. and Lund, D. B. Consideration in calculating kinetic parameters from experimental data // J. Food Proc. Eng. — 1985. — № 7. — P. 239–251.
3. Bates, R. G. Determination of pH: Theory and Practice. — 2nd ed. — NY: John Wiley & Sons, 1973.
4. Bell, L. N. and Labuza, T. P. Aspartame degradation kinetics as affected by pH in intermediate and low moisture food systems // J. Food Sci. — № 56. — P. 17–20.
5. Bell, L. N. and Labuza, T. P. Influence of the low moisture state on pH and its implications for resaction kinetics // J. Food Eng. — 1994. — № 22. — P. 291–312.
6. Bell, L. N. and Labuza, T. P. Aspartame stability in commercially sterilized flavored dairy beverages // J. Dairy Sci. — 1994. — № 77. — P. 34–38.

7. Bell, L. N., Shoeman, D., Tsoubeli, M., and Labuza, T. P. Kinetics of aspartame degradation in liquid dairy beverages // *Developments in Food Engineering* / Yano, T., Matsuno, R., Nakamura K. (eds.). — London: Blackie Academic and Professional, 1994. — P. 489–491. — (Proceedings of the 6th Int. Congress on Engineering and Food).
8. Benson, S. W. *Foundations of Chemical Kinetics*. — NY: McGraw-Hill, 1960.
9. Bergquist, S., and Labuza, T. P. Kinetics of peroxide formation in potato chips undergoing a sine wave temperature fluctuation // *J. Food Sci.* — 1983. — № 43. — P. 712.
10. Beuchat, L. R. Microbial stability as affected by water activiti // *Cereal Foods World*. — 1981. — № 26. — P. 345–349.
11. Boyle, W. C., Berthouex, P. M., and Rooney, T. C. Pitfalls in parameter estimation for oxygen transfer data // *J. Environ. Eng.* — 1974. — № 100. — P. 391–408.
12. Buchanan, R. L. Predictive food microbiology // *Trends Food Sci. Technol.* — 1993. — № 4. — P. 6–11.
13. Bunher, D. Simple kinetic models from Arrhenius to computer // *Accts. Chem. Res.* — 1974. — № 7. — P. 195.
14. Bushill, J. H., Wright, W. B., Fuller, C. H. F., and Bell, A. V. The crystallization of lactose with particular reference to its occurrence in milk powders // *J. Sci. Food Agr.* — 1965. — № 16. — P. 622.
15. Buera, P. and Karel, M. Application of the WLF equation to describe the combined effects of moisture, temperature and physical changes on non-enzymatic browning rates in food systems, // *J. Food Proc. Preserv.* — 1993. — № 17. — P. 31–47.
16. Byrne, C. H. Temperature indicators — the state of the art // *Food Technol.* — 1976. — № 30(6). — P. 66–68.
17. Cardoso, G., and Labuza, T. P. Effect of temperature and humidity on moisture transport for pasta packaging material // *Br. J. Food Technol.* — 1983. — № 18. — P. 587.
18. Cheftel, J. C., Cuq, J., and Lorient, D. Aminoacids, peptides and proteins // *Food Chemistry* / Fennema, O. R. (ed.). — NY: Marcel Dekker, 1968.
19. Chen, S. L. and Gutmanis, F. Auto-oxidation of extractable color pigments in chili pepper with special reference to ethoxyquin treatment // *J. Food Sci.* — 1968. — № 33. — P. 274–280.
20. Chen, J. H. and Zall, R. R. Packaged milk, cream and cottage cheese can be monitored for freshness using polymer indicator labels // *Dairy Food Sanitation*. — 1987. — № 7(8). — P. 402.
21. Chirife, J. and Buera, P. Water activity, glass transition and microbial stability in concentrated/semimoist food systems // *J. Food Sci.* — 1994. — № 59. — P. 921–927.
22. Cohen, E. and Saguy, I. The effect of water activity and moisture content on the stability of beet powder pigments // *J. Food Sci.* — 1982. — № 48. — P. 703–707.
23. Cohen, E. and Saguy, I. Statistical evaluation of Arrhenius model and its applicability in prediction of food quality losses // *J. Food Proc. Pres.* — 1985. — № 9. — P. 273–290.
24. Davey, K. R. A predictive model for combined temperature and water activity on microbial growth during the growth phase // *J. Appl. Bacteriol.* — 1989. — № 67. — 483–488.
25. BMDP — Statistical Software / Dixon, W. J. (ed.). — Berkley, CA: University of California Press, 1989.
26. Draper, N. and Smith, H. *Applied Regression Analysis*. — 2nd ed. — New York, NY: Wiley, 1981.
27. Engel. *Enzyme kinetics. The steady-state approach*. — 2nd ed. — NY: Chapman and Hall, 1981.
28. Feeney, R. E., Blackenhorn, G., Dixon, H. B. F. Carbohydrate-amine reactions in protein chemistry // *Adv. Protein Cehm.* — 1975. — № 29. — P. 135–203.

29. Feeney, R. E., Whitaker, J. R. The Maillard reaction and its preservation // Food Protein Deterioration, Mechanisms and Functionality / Cerry, J. P. (ed.). — Washington, D. C.: ACS, 1982. — P. 201–229. — (ACS Symposium Series 206).
30. Fennema, O., Powrue, W. D., Marth, E. H. Low-Temperature Preservation of Foods and Living Matter. — NY: Marcel-Dekker, 1973.
31. Ferry, J. D. Viscoelastic Properties of Polymers. — 3rd ed. — NY: Wiley, 1980.
32. Fogler, H. S. Elements of Chemical Reaction Engineering. — Englewood Cliffs, NJ, 63: Prentice Hall, 1986.
33. Fu, B. and Labuza, T. P. Shelf-life prediction: theory and application // Food Control. — 1993. — № 4. — 125–133.
34. Fu, B., Taoukis, P. S., and Labuza, T. P. Predictive microbiology for monitoring spoilage of dairy products with time temperature indicators // J. Food Sci. — 1991. — № 56. — P. 1209–1215.
35. Guadagni, D. G. Cold storage life of frozen fruits and vegetables as function of temperature and time // Low Temperature Biology of Foodstuffs / Hawthorne, J., and Rolfe, E. J. (eds.). — NY: Pergamon Press, 1968.
36. Haralampu, S. G., Saguy, I., and Karel, M. Estimation of Arrhenius model parameters using three least squares methods // J. Food Proc. Pres. — 1985. — № 9. — P. 129–143.
37. Hayakawa, K. New procedure for calculating parametric values for evaluating cooling treatments applied to fresh foods // Can. Inst. Food Sci. Technol. — 1973. — № 6(3). — P. 197.
38. Hendel, C. E., Silveira, V. G., and Harrington, W. O. Rates of nonenzymatic browning of white potato during dehydration // Food Technol. — 1955. — № 9. — P. 433.
39. Herborg, L. Shelf-life quality: a question of relativity // I. I. F. — I. I. R. — (Commissions C2, D3). — Paris: International Institute of Refrigeration, 1985. — № 4. — P. 39–43.
40. Hills, C. G. Jr. An Introduction to Chemical Engineering Kinetics and Reactor Design. — NY: John Wiley & Sons, 1977.
41. Hills, C. G. Jr., Grieger-Block, R. A. Kinetic data: generation, interpretation, and use // Food Technol. — 1980. — № 34. — P. 56–66.
42. Holmer, B. Properties and stability of aspartame // Food Technol. — 1984. — № 38. — P. 50.
43. Hong, Y. C., Koelsch, C. M., and Labuza, T. P. Using the L number to predict the efficacy of moisture barrier properties of edible food coating materials // J. Food Proc. Pres. — 1991. — № 15. — P. 45–62.
44. Hoover, D. G. Pressure effects on biological systems // Food Technol. — 1993. — № 47(6). — P. 150–155.
45. Institute of Food Science and Technology (UK). Shelf-Life of Foods — Guidelines for Its Determination and Prediction. — London: IFST, 1993.
46. Kader, A. A. Biochemical and physiological basis for effects of controlled and modified atmospheres on fruits and vegetables // Food Technol. — 1986. — № 40(5). — P. 99.
47. Kamman, J. F., Labuza, T. P., and Warthesen, J. J. Kinetics of thiamin loss in pasta as a function of constant and variable storage conditions // J. Food Sci. — 1981. — № 46(5). — P. 1457.
48. Karel, M. Effects of water activity and water content on mobility of food components, and their effects on phase transitions in food systems // Properties of Water in Food / Simatos, D. and Multon, J. L. (eds.). — Nijhoff, Dordrecht: Martinus, 1985. — P. 153–169.
49. Karel, M. Temperature-dependence of food deterioration processes (Letter to the editor) // J. Food Sci. — 1993. — № 58(6). — P. ii.

50. Karel, M. and Saguy, I. Effect of water on diffusion on food systems // *Water relation in Foods* / Levine, H. and Slade, L. (eds.). — NY: Plenum Press, 1993. — P. 157–181.
51. Katz, E. E. and Labuza, T. P. Effect of water activity on the sensory crispness and mechanical deformation of snack food products // *J. Food Sci.* — 1981. — № 46. — P. 403.
52. Kim, M. N., Saltmarch, M., and Labuza, T. P. Nonenzymatic browning of hygroscopic whey powders in open vs. sealed pouches // *J. Food Proc. Preserv.* — 1981. — № 5. — P. 49.
53. Kirkwood, T. B. L. Predicting the stability of biological standards and products // *Biometrics.* — 1977. — № 33. — P. 736.
54. Knorr, D. Effects of high-hydrostatic-pressure on food safety and quality // *Food Technol.* — 1993. — № 47(6). — P. 155–161.
55. Kochhar, S. P. and Rossel, J. B. A vegetable oiling agent for dried fruits // *J. Food Technol.* — 1982. — № 17. — P. 661.
56. Koelsch, C. M., Downes, T. W., and Labuza, T. P. Hexanol formation via lipid oxidation as a function of oxygen concentration: Measurement and kinetics // *J. Food Sci.* — 1991. — № 56. — P. 816–820.
57. Kramer, A. Storage retention of nutrients // *Food Technol.* — 1974. — № 28. — P. 5.
58. Kramer, A. and Twigg, B. Measure of frozen food quality and quality changes // *The Freezing Preservation of Foods* / Tressler, D. K. (ed.). — Westport, Conn.: AVI Publishing, 1968. — 4th ed. — Vol. 2.
59. Kwolek, W. F. and Bookwalter, G. N. Predicting storage stability from time-temperature data // *Food Technol.* — 1971. — № 25(10). — P. 51.
60. Labuza, T. P. Kinetics of lipid oxidation of foods // *C. R. C. Rev. Food Technol.* — 1971. — № 2. — P. 355.
61. Labuza, T. P. Oxidative changes in foods at low and intermediate moisture levels // *Water Relations of Foods* / Duckworth, R. (ed.). — NY: Academic Press, 1975. — 455 p.
62. Labuza, T. P. A theoretical comparison of losses in foods under fluctuating temperature sequences // *J. Food Sci.* — 1979. — № 44. — P. 1162.
63. Labuza, T. P. Temperature/enthalpy/entropy compensation in food reactions // *Food Technol.* — 1980. — № 34(2). — P. 67.
64. Labuza, T. P. The effect of water activity on reaction kinetics of food deterioration // *Food Technol.* — 1980. — № 34. — P. 36.
65. Labuza, T. P. *Shelf-Life Dating of Foods.* — Westport, CT: Food & Nutrition Press, 1982.
66. Labuza, T. P. Application of chemical kinetics to deterioration of foods // *J. Chem. Educ.* — 1984. — № 61. — P. 348–358.
67. Labuza, T. P. An integrated approach to food chemistry: Illustrative cases // *Food Chemistry* / Fennema, O. R. (ed.). — NY: Marcel Dekker, 1985. — Ed. 2. — P. 913–938.
68. Labuza, T. P. and Breene, W. M. Applications of «active packaging» for improvement of shelf-life and nutritional quality of fresh and extended shelf-life refrigerated foods // *J. Food Process. Pres.* — 1989. — № 13. — P. 1–69.
69. Labuza, T. P. and Contreras-Medellin, R. Prediction of moisture protection requirements for foods // *Cereal Foods World.* — 1981. — № 26. — P. 335–343.
70. Labuza, T. P. and Kamman, J. Reaction kinetics and accelerated tests simulation as a function of temperature // *Applications of Computers in Food Research* / Saguy, I. (ed.). — NY: Marcel Dekker, 1983. — Chap. 4.

71. Labuza, T. P. and Ragnarsson, J. O. Kinetic history effect on lipid oxidation of methyl linoleate in model system // *J. Food Sci.* — 1985. — № 50(1). — P. 145.
72. Labuza, T. P. and Riboh, D. Theory and application of Arrhenius kinetics to the prediction of nutrient losses in food // *Food Technol.* — 1982. — № 36. — P. 66–74.
73. Labuza, T. P. and Schmidl, M. K. Accelerated shelf-life testing of foods // *Food Technol.* — 1985. — № 39(9). — P. 57–62, 74.
74. Labuza, T. P. and Schmidl, M. K. Use of sensory data in the shelf-life testing of foods: principles and graphical methods for evaluation // *Cereal Foods World.* — 1988. — № 33(20). — P. 193–206.
75. Labuza, T. P. and Taoukis, P. S. The relationship between processing and shelf life // *Foods for the 90's* / Birch, G. G., Campbell-Platt, G., and Lindley, M. G. (eds.). — 1990. — London: Elsevier Applied Science, 1990. — P. 73–105. — (Developments Series).
76. Labuza, T. P., Bohnsack, K., and Kim, M. N. Kinetics of protein quality loss stored under constant and square wave temperature distributions // *Cereal Chem.* — 1982. — № 59. — P. 142.
77. Labuza, T. P., Fu, B., and Taoukis, P. S. Prediction for shelf-life and safety minimally processed CAP/MAP chilled foods // *J. Food Protection.* — 1992. — № 55. — P. 741–750.
78. Labuza, T. P., Mizrahi, S., and Karel, M. Mathematical models for optimization of flexible film packaging of foods for storage // *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* — 1972. — № 15. — P. 150.
79. Labuza, T. P., Tannenbaum, S. R., and Kavel, M. Water content and stability of low-moisture and intermediate-moisture foods // *Food Tech.* — 1969. — № 24. — P. 35–39.
80. Lenz, M. K. and Lund, D. B. Experimental procedures for determining destruction kinetics of food components // *Food Technol.* — 1980. — № 34(2). — P. 51.
81. Levine, H. and Stade, L. Collapse phenomena — a unifying concept for interpreting the behavior of low moisture foods // *Food Structure- Its Creation and Evaluation* / Blanshard, J. M. V. and Mitchell, J. R. (eds.). — London: Butterworths, 1988. — P. 149–180.
82. Lund, D. B. Considerations in modeling food processes // *Food Technol.* — 1983. — № 37(1). — P. 92.
83. MacKenzie, A. P. Non-equilibrium freezing behavior of aqueous systems // *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.* — 1977. — № 278. — P. 167–189.
84. Mackie, I. M., Howgate, P., Laird, W. M., Ritchie, A. H. Acceptability of frozen stored consumer fish products // *I. I. F. — I. I. R. (Commissions C2, D3).* — 1985. — № 4. — P. 161–167.
85. Maesmans, G., Hendrickx, M., De Cordt, S., Tobback, P. Theoretical consideration of the general validity of the equivalent point method in thermal process evaluation // *J. Food Eng.* — 1995. — № 24. — P. 225–248.
86. Margerison, D. The treatment of experimental data // *Comprehensive Chemical Kinetics, The Practice of Kinetic* / Banford, C. H. and Tipper, C. F. H. (eds.). — NY: Elsevier, 1969.
87. McClure, P. J., Blackburn, C. de W., Cole, M. B., Curtis, P. S., Jones, J. E., Legan, J. D., Ogden, I. D., Peck, M. W., Roberts, T. A., Sutherland, J. P., and Walker, S. J. Modeling the growth, survival and death of microorganisms in foods: the U. K. foodmodel approach // *Int. J. of Food Microbiol.* — 1994. — № 23. — P. 265–275.
88. McKekin, T. A., Olley, J. N., Ross, T., and Ratkowsky, D. A. *Predictive Microbiology: Theory and Application.* — Somerset, U. K.: Research Studies Press, 1993.
89. Mizrahi, S., Labuza, T. P., and Karel, M. Computer aided predictions of food storage stability // *J. Food Sci.* — 1970. — № 35. — P. 799–803.

90. Mizrahi, S., Labuza, T. P., and Karel, M. Feasibility of accelerated tests for browning in dehydrated cabbage // *J. Food Sci.* — 1970. — № 35. — P. 804–807.
91. Mohr, P. W. and Krawiec, S. Temperature characteristics and Arrhenius plots for nominal psychrophiles, mesophiles and thermophiles // *J. Gen. Microbiol.* — 1980. — № 121. — P. 311–317.
92. Nakabayashi, K., Shimamoto, T., and Mina, H. Stability of package solid dosage forms // *Chem. Pharm.* — 1981. — № 28(4). — P. 1090. — № 29(7). — P. 2027, 2051, 2057.
93. Nelson, R. R. Stability prediction using the Arrhenius model // *Comput. Program Biomed.* — 1983. — № 16. — P. 55–60.
94. Nelson, K. Reaction Kinetics of Food Stability: Comparison of Glass Transition and Classical Models for Temperature and Moisture Dependence. — St. Paul, MN: Univ. of Minnesota, 1993. — (Ph. D. Thesis.)
95. Nelson, K. and Labuza, T. P. Water activity and food polymer science: implications of state on Arrhenius and WLF models in predicting shelf-life // *J. Food Eng.* — 1994. — № 22. — P. 271–290.
96. Norwig, J. F. and Thompson, D. R. Microbial population, enzyme and protein changes during processing // *Physical and Chemical Properties of Foods* / Okos, M. R. (ed.). — St. Joseph, MI: Am. Soc. Agric. Eng., 1986.
97. Nunes, R. V. and Swartzel, K. R. Modeling thermal processes using the equivalent point method // *J. Food Eng.* — 1990. — № 11. — P. 107–117.
98. Ot, L. An Introduction to Statistical Methods and Data Analysis. — 2nd ed. — Boston, MA: PWS Publishers, 1984.
99. Parkin, K. L. and Brown, W. D. Preservation of seafood with modified atmospheres // *Chemistry and Biochemistry of Marine Food Products* / Martin, E. at al. (eds.). — Westport, CT: AVI Publishing, 1982. — P. 453–465.
100. Pecek, C., Warthesen, J., and Taoukis, P. A kinetic model for the equilibration of isomeric  $\beta$ -carotenes // *J. Food Agric. Chem.* — 1990. — № 38. — P. 41–45.
101. Peleg, M. On the use of WLF model in polymers and foods // *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* — 1992. — № 32. — P. 59–66.
102. Peleg, M. A model of temperature effects on microbial populations from growth to lethality // *J. Sci. Food Agri.* — 1995. — № 68. — P. 83–89.
103. Puolsen, K. P. and Lindelov, F. Stability of frozen systems and frozen foods. — Lyngby, Denmark: Food Technology Laboratory, DtH, DK 2800 Lyngby, 1975.
104. Quast, D. G. and Karel, M. Computer simulation of storage life of foods undergoing spoilage by two interactiv mechanisms // *J. Food Sci.* — 1972. — № 37. — P. 679.
105. Quast, D. G., Karel, M., and Rand, W. Development of a mathematical model for oxidation of potato chips as a function of oxygen pressure, extent of oxidation and equilibrium relative humidity // *J. Food Sci.* — 1972. — № 37. — P. 679.
106. Ramaswamy, H. S., Van de Voort, F. R., and Ghazala, S. An analysis of TDT and Arrhenius methods for handling process and kinetic data // *J. Food Sci.* — 1989. — № 54. — P. 1322–1326.
107. Ratkowsky, D. A., Olley, J., McMeekin, T. A., and Ball, A. Relationship between temperature and growth rate of bacterial cultures // *J. Bacteriol.* — 1982. — № 149. — P. 1–5.
108. Ratkowsky, D. A., Lowry, R. K., McMeekin, T. A., Stokes, A. N., and Chandler, R. E. Model for bacterial culture growth rate throughout the entire biokinetic temperature range // *J. Bacteriol.* — 1983. — № 154. — P. 1222–1226.



109. Riboh, D. K. and Labuza, T. P. Kinetics of thiamine loss in pasta stored in a sine wave temperature condition // J. Food Proc. Pres. — 1982. — № 6(4). — P 253.
110. Roos, Y. H. Water activity and physical state effects on amorphous food stability // J. Food Proc. Pres. — 1993. — № 16. — P. 433–452.
111. Roos, Y. H. and Karel, M. Differential scanning calorimetry study of phase transitions affecting quality of dehydrated materials // Biotechnol. Prog. — 1990. — № 6. — P. 159–163.
112. Roos, Y. and Karel, M. Plastisizing effect of water on thermal behavior and crystallization of amorphous food models // J. Food Sci. — 1991. — № 56. — P. 38–43.
113. Ross, T. and McMeekin, T. A. Predictive micromiology // Int. J. Food Micro. — 1994. — № 23. — P. 242–264.
114. Rosso, L., Lobry, J. R., Bajard, S., and Flandrois, J. P. Convenient model to describe the combined effects of temperature and pH on microbial growth // Appl. Envir. Micro. — 1995. — № 61. — P. 610–616.
115. Saguy, I. S. and Cohen, E. Shelf-life prediction course notes, Course #71917. — Rebovot, Israel: The Hebrew University of Jerusalem, Faculty of Agriculture, 1990.
116. Saguy, I. and Karel, M. Modeling of quality deterioration during food processing and storage // Food Technol. — 1980. — № 34(2). — P. 78–85.
117. Saguy, I., Kopelman, I. J., and Mizrahi, S. Extent of nonenzymatic browning in grapefruit juice during thermal and concentration processes: kinetics and prediction // J. Food Process. Pres. — 1979. — № 2. — P. 175.
118. Saltmarch, M. and Labuza, T. P. Kinetics of browning and protein quality loss in sweet whey powders under steady and non-steady state storage conditions // J. Food Sci. — 1982. — № 47. — P. 92.
119. Sapers, G. M. Flavor quality in explosion puffed dehydrated potato // J. Food Sci. — 1992. — № 35. — P. 371.
120. Sapru, V. and Labuza, T. P. Glassy state in bacterial spores predicted by glass transition theory // J. Food Sci. — 1992. — № 58. — P. 445–448.
121. Simon, I., Labuza, T. P., and Karel, M. Computer aided prediction of food storage stability: oxidation of a shrimp food product // J. Food Sci. — 1971. — № 36. — P. 280.
122. Singh, R. P. and Wang, C. Y. Quality of frozen foods — a review // J. Food Proc. Eng. — 1977. — № 1. — P. 97–127.
123. Singh, R. P. and Wells, J. H. Keeping track of time and temperature: new improved indicators may become industry standards // Meat process. — 1986. — № 25(5). — P. 41–42, 46–47.
124. Shoofield, R. M., Sharpe, P. J. H., and Magnuson, C. E. Non-linear regression of biological temperature-dependent rate models based on absolute reaction-rate theory // J. Theor. Biol. — 1981. — № 88. — P. 719–731.
125. Slade, L., Levine, H., and Finey, J. Protein-water interactions: water as a plasticizer of gluten and other protein polymers // Protein Quality and the Effects of Processing / Phillips, R. D. and Finlay, J. W. (eds.). — NY: Marcel Dekker, 1989. — P. 9–123.
126. Stamp, J. A. Kinetics and Analysis of Aspartame Decomposition Mechanisms in Aqueous Solutions using Multiresponse Methods, Ph. D. Thesis. — St. Paul, MN: Univ. of Minnesota, 1990.
127. Stamp, J. A. and Labuza, T. P. An ion-pair high performance liquid chromatographic method for the determination of aspartame and its decomposition products // J. Food Sci. — 1989. — № 54. — P. 1043.

128. Taoukis, P. S., Breene, W. M., and Labuza, T. P. Intermediate-moisture foods // *Advanced in Cereal Science and Technology*. — Vol. 9 / Pomeranz, Y. (ed.); American Association of Cereal Chemists. — 1988. — P. 91–128.
129. Taoukis, P. S., El Meskine, A., and Labuza, T. P. Moisture transfer and shelf life of packaged foods // *Food and Packaging Interactions* / Hotchkiss, J. H. (ed.). — № 365. — P. 243–261. — (ACS Symposium Series).
130. Taoukis, P. S. and Labuza, T. P. Applicability of time-temperature indicators as shelf-life monitors of food products // *J. Food Sci.* — 1989. — № 54. — P. 783–788.
131. Taoukis, P. S. and Labuza, T. P. Reliability of time-temperature indicators as food quality monitors under non isothermal conditions // *J. Food Sci.* — 1989. — № 54. — P. 789–792.
132. Taoukis, P. S., Reineccius, G. A., and Labuza, T. P. Application of time-temperature indicators to monitor quality of flavors and flavored products // *Flavors and Off-Flavors '89* / Charmabus, G. (ed.). — London: Elsevier, 1990. — P. 385–398.
133. Taoukis, P. S., Fu, B., and Labuza, T. P. Time-temperature indicators // *Food Technol.* — 1991. — № 45(10). — P. 70–82.
134. Templeman, G., Sholl, J. J., Labuza, T. P. Evaluation of several pulsed NMR techniques for solids in fat determination in commercial fats // *J. Food Sci.* — 1977. — № 42. — P. 432.
135. Thompson, D. Response surface experimentation // *J. Food Proc. Preserv.* — 1983. — № 6. — P. 155–188.
136. Tinker, J. H., Slavin, J. W., Learson, R. J., and Empola, V. G. Evaluation of automated time-temperature monitoring system in measuring the freshness of chilled fish // *I. I. F. — I. I. R. Commissions C2, D3*. — 1985. — № 4. — P. 286.
137. Trant, A. S., Pangborn, R. M., and Little, A. C. Potential fallacy of correlating hedonic responses with physical and chemical measurements // *J. Food Sci.* — 1981. — № 41. — P. 583.
138. Tsoumbeli, M. N. and Labuza, T. P. Accelerated kinetic study of aspartame degradation in the neutral pH range // *J. Food Sci.* — 1991. — № 56. — P. 1671–1675.
139. Tuma, J. J. *Engineering Mathematics Handbook*. — 3rd ed. — NY: McGraw-Hill, 1988.
140. Weissman, I., Ramon, O., Kopelman, I. J., and Mizrahi, S. A kinetic model for accelerated tests of Maillard browning in a liquid model system // *J. Food Proc. Pres.* — 1993. — № 17. — P. 455–470.
141. Wells, J. H. and Singh, R. P. Application of time-temperature indicators in monitoring changes in quality attributes of perishable and semi-perishable foods // *J. Food Sci.* — 1998. — № 53(1). — P. 148.
142. White, G. W. and Cakebread, S. H. The glassy state in certain sugar containing food products // *J. Food Tech.* — 1966. — № 1. — P. 73.
143. Whiting, R. C. and Buchanan, R. L. Microbial modeling // *Food Tech.* — 1994. — № 48. — P. 113–120.
144. Williams, M. L., Landel, R. F., and Ferry, J. D. The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids // *J. Chem. Eng.* — 1955. — № 77. — P. 3701–3707.
145. Willcox, F., Mercier, M., Hendrick, M., and Tobback, P. Modelling the influence of temperature and carbon dioxide upon the growth of *Pseudomonas fluorescens* // *Food Micro.* — 1993. — № 10. — P. 159–173.
146. Wold, S. Analysis of kinetic data by means of spline functions // *Chem. Scripta*. — 1971. — № 1. — P. 97.

147. Yoshioka, S., Aso, Y., and Uchiyama, M. Statistical evaluation of nonisothermal prediction of drug stability // J. Pharmaceutical Sci. — 1987. — № 76(10). — P. 794–798.
148. Zobel, H. F. A review of bread staling // Baker's Dig. — 1973. — № 47(5). — P. 52.
149. Zwietering, M. H., De Koos, J., Hasenack, B. E., DeWilt, J. C., and Van't Riet, K. Modeling of bacterial growth as a function of temperature // Appl. Environ. Microbiol. — 1991. — № 57. — P. 1094–1101.

## Дополнительная отечественная литература

1. Окрепилов В.В. Управление качеством. — М.: Экономика, 1998. — 639 с.
2. ГОСТ 15467–79. Управление качеством продукции. Основные понятия, термины и определения. — М.: Госстандарт, 1990. — 26 с.
3. Панченков Г.М., Лебедев В.П. Химическая кинетика и катализ. — М.: Химия, 1985. — 590 с.
4. Полак Л.С. Неравновесная химическая кинетика и ее применение. — М.: Наука, 1979. — 247 с.
5. Уэйт Н. Химическая кинетика / Пер. с англ. Н. Ф. Казанской. — М.: Мир, 1974. — 77 с.
6. Волькенштейн М.В. Общая биофизика. — М.: Наука, 1978. — 590 с.

# 10 ДОПУСТИМЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ ПРИ СБЫТЕ И ПРОДАЖАХ

*Джон Генри Уэллс и Р. Пол Сингх*

*Перевод В. Ашкинази под науч. ред. к. т. н., доцента Буровой Т. Е.*

## Содержание

- 10.1 Введение
- 10.2 Качество замороженных пищевых продуктов
  - 10.2.1 Показатели качества пищевых продуктов. Номенклатура показателей качества
  - 10.2.2 Методы оценки качества
    - 10.2.2.1 *Дискриминантные методы*
    - 10.2.2.2 *Дескриптивные методы*
  - 10.2.3 Срок годности при хранении продуктов
    - 10.2.3.1 *Стратегии определения срока хранения*
    - 10.2.3.2 *Критерий срока годности при хранении*
- 10.3 Моделирование изменений качества замороженных продуктов
  - 10.3.1 Влияние температуры и продолжительности хранения на изменение качества замороженных продуктов
  - 10.3.2 Подходы к кинетическому моделированию
    - 10.3.2.1 *Математическая структура кинетической модели*
  - 10.3.3 Алгоритмы компьютерного моделирования
- 10.4 Управление запасами с точки зрения логистики
  - 10.4.1 Накопление запасов
  - 10.4.2 Управление запасами скоропортящихся товаров
    - 10.4.2.1 *Стратегии управления запасами*
    - 10.4.2.2 *Сравнение стратегий управления запасами*
  - 10.4.3 Управление запасами на основе оценки качества
    - 10.4.3.1 *Прогнозирование остающегося срока годности при хранении*
  - 10.4.4 Экономический эффект управления запасами

Глоссарий

Условные обозначения

Дополнительная информация и ресурсы

Литература

Дополнительная отечественная литература

## 10.1 Введение

Все пищевые продукты независимо от способа их хранения или упаковки со временем подвергаются порче. Для хранения фруктов и овощей в свежем виде используются режимы охлаждения, которые позволяют снизить дыхательную активность продукции и интенсивность размножения микроорганизмов [49]. Хранение замороженных и охлажденных мясных, рыбных изделий и продуктов из птицы сопровождается биохимическими изменениями, являющимися результатом ферментативной активности. Такие продукты требуют строгого соблюдения температурных условий хранения [7].

Для длительного хранения пищевых продуктов оптимальным является применение замораживания [10]. Замораживание и хранение в замороженном состоянии позволяют максимально сохранить цвет, вкус, аромат, питательную ценность пищевых продуктов, в меньшей степени — структуру. Однако длительное хранение пищевых продуктов в замороженном состоянии приводит к некоторым потерям качества, что зависит от вида продукта, технологии замораживания, температуры и продолжительности хранения, то есть температурной «предыстории» — кумулятивного эффекта температуры и продолжительности хранения [36].

На конечное качество любого готового замороженного пищевого продукта преимущественно влияют четыре фактора:

- 1) исходное качество продукта;
- 2) способ обработки и вид упаковки;
- 3) температура хранения;
- 4) продолжительность хранения [44].

На сохраняемость качества замороженных пищевых продуктов решающее влияние оказывают температура и продолжительность хранения [21, 22]. Повышение температуры хранения выше рекомендованной отрицательно сказывается на их сохраняемости. Таким образом, для поддержания качества замороженных пищевых продуктов в процессе хранения и при сбыте необходим надлежащий контроль температуры, который, однако, зачастую не осуществляется [42].

## 10.2 Качество замороженных пищевых продуктов

### 10.2.1 Показатели качества пищевых продуктов.

#### Номенклатура показателей качества

Ухудшение качества пищевых продуктов — это сложная проблема, которая включает аспекты безопасности потребления, состава продуктов, их физических и химических свойств, изменения ферментативной активности, микробиального загрязнения и роста микроорганизмов.

С точки зрения потребителя качество определяется специфическими и (или) преобладающими характеристиками, присущими пищевому продукту, что позволя-

ет выражать качество конкретного продукта через ожидание или предпочтение определенных *качественных свойств* [32]. Кроме того, качество продукции можно определить как совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности человека в соответствии с назначением [I, II].

Для количественной характеристики одного или нескольких свойств продукции, входящих в ее качество, введено понятие показателя качества (ПК) продукции. Номенклатура ПК зависит от назначения продукции и включает:

- единичный ПК, характеризующий одно из свойств продукции;
- комплексный ПК, характеризующий несколько свойств продукции;
- определяющий ПК — ПК продукции, по которому принимают решение оценивать ее качество;
- интегральный ПК — ПК продукции, являющийся отношением суммарного полезного эффекта от эксплуатации или потребления продукции к суммарным затратам на ее создание и эксплуатацию или потребление [I].

Также *качественные свойства* продукта (или показатель качества) можно выразить количественно через наличие желаемых (или отсутствие нежелательных) характеристик. Таким образом, продукт с более выраженными желательными характеристиками будет расцениваться как более качественный, а продукт, у которого те же характеристики выражены в меньшей степени, — как менее качественный.

Процесс порчи пищевых продуктов связан с появлением и развитием нежелательных сочетаний показателей качества, что приводит к изменению органолептических свойств, питательной ценности, потере конкретным продуктом эстетической привлекательности, а возможно, и безопасности.

В Российской Федерации качество пищевых продуктов регламентируется нормативными документами, имеющими силу закона, — стандартами и техническими условиями [3, 4, 5].

В соответствии с законом РФ «О стандартизации» [IV] стандарты могут быть государственными (ГОСТы) и международными, а также стандарты отраслей (ОСТы), предприятий, научно-технических, инженерных обществ и других общественных организаций. Государственные и отраслевые стандарты не являются объектом авторского права в отличие от стандартов предприятий и технических условий (ТУ). Все стандарты на новые виды сырья и продуктов питания при их представлении на утверждение Государственному комитету РФ по стандартизации (Госстандарту РФ) подлежат предварительному обязательному согласованию с органами здравоохранения (санэпиднадзора). Кроме стандартов и ТУ Минздравом РФ издаются обязательные для исполнения постановления, санитарные правила, инструкции и указания. Существует система государственного надзора за качеством пищевых продуктов. В эту систему входят: ветеринарная служба; государственная инспекция по качеству товаров и торговле (госторгинспекция); бюро товарных экспертиз торгово-промышленной палаты; ведомственная санитарная служба; государственная санитарно-эпидемиологическая служба. В настоящее время в соответствии с законом РФ «О защите прав потребителей» и законом РФ «О сертификации продукции и услуг» [IV, V] проводится обязательная сертификация тех пищевых продуктов, на которые в законодательных актах или стандартах предусмотрены требования по безопасности для здоровья и жизни граждан, а также окружающей среды. Кроме сертификата качества пищевых продуктов органами санэпиднадзора выдаются гигиенические сертификаты соответствия, гарантирующие безопасность продуктов питания, например, по содержанию нитратов, нитритов, пестицидов, солей тяжелых металлов и других вредных веществ [V].

## 10.2.2 Методы оценки качества

Методы оценки качества пищевых продуктов традиционно подразделяются на субъективные и объективные. К первой группе относятся социологические, экспер-

тные и органолептические (сенсорные) методы. Вторая группа включает измерительные (экспериментальные) и расчетные методы [I].

При использовании социологических методов определение ПК продукции осуществляется на основе сбора и анализа мнений ее фактических или возможных потребителей. В основу экспертных методов определения ПК продукции положены решения, принимаемые экспертами. Под органолептической оценкой ПК пищевых продуктов понимают общие приемы оценки, при которых информация о качестве продуктов воспринимается посредством органов чувств.

В расчетных методах определения ПК продукции используются теоретические и (или) эмпирические зависимости показателей качества продукции от ее параметров. Измерительный метод определения ПК продукции осуществляется на основе применения технических средств измерения. В настоящее время для исследования качественных изменений, протекающих в пищевых продуктах в процессе обработки, консервирования и хранения, используются различные физические, физико-химические, биохимические, микробиологические и другие методы анализа. В пищевой технологии применяются методы хроматографии (адсорбционной, газожидкостной, ионообменной и др.), электрофореза, спектроскопии, масс-спектроскопии, электронно-парамагнитный резонанс, ядерный магнитный резонанс, потенциометрические, электрометрические, полярографические, реологические, радиоизотопные и др. методы. Применение указанных методов оценки качества пищевых продуктов предполагает использование сложного оборудования, приборов и чаще используется в научных исследованиях. На пищевых предприятиях в большинстве случаев применяют экспресс-методы. Так, для определения содержания растворимых сухих веществ, простых углеводов применяются методы рефрактометрии, кислотности – титриметрический, консистенции – реологические и т. д.

Физические, химические, ферментативные и микробиологические изменения, которые вносят вклад в восприятие качества замороженных пищевых продуктов, можно обнаружить инструментально и органолептически. Например, окисление липидов мяса и рыбы может выражаться в развитии привкуса прогорклости, обнаруживаемого органолептически или при аналитическом контроле количества побочных продуктов реакции окисления. Качество замороженных пищевых продуктов (и критерий приемлемости для потребителя) может рассматриваться как сочетание характерных химических и сенсорных признаков. Изменение во время хранения одного или нескольких таких признаков в конечном счете может привести к отказу потребителя от продукта. Выявление и количественное определение признаков, характеризующих изменение качества во время испытательного хранения, позволит предложить средства оценки совместного влияния температуры и продолжительности хранения на изменение качества. Для проверки безопасности пищевых продуктов помимо органолептической оценки целесообразно использовать средства микробиологического и токсикологического контроля.

Современный уровень органолептического анализа способен обеспечить объективность и надежность результатов, причем точность и достоверность полученных результатов зависят от квалификации, навыков и способностей лиц, определяющих их. Органолептический метод не исключает возможности использования технических средств (лупа, микроскоп и т. д.), повышающих восприимчивость и разрешающие способности органов чувств [I, VI].

Методы органолептического (сенсорного) анализа классифицируют на группы [6]:

- дискриминантные (различительные);
- дескриптивные (описательные);
- предпочтительно-приемлемые, используемые для выяснения отношения потребителей к качеству продуктов.

Для получения достоверных результатов при исследовании хранения замороженных продуктов очень важны отбор проб и их подготовка. Разработка детализированной и воспроизводимой процедуры отбора и подготовки проб позволит минимизировать изменения качественных характеристик продукта, возникших как следствие условий эксперимента. Органолептический анализ замороженных продуктов может потребовать разработки нестандартных экспериментальных процедур для сохранения качества продукта при подготовке проб [9]. В идеале любые изменения качества, обнаруживаемые органолептически или инструментально, должны быть исключительно следствием условий эксперимента.

#### *10.2.2.1 Дискриминантные методы*

Дискриминантные (различительные) методы применяют для нахождения различий и определения направления изменений. К этой группе относятся методы парного и треугольного сравнения, дуо-трио, ранговый метод, с помощью которых изучают влияние сырья, рецептуры, технологических параметров, условий хранения на органолептические показатели качества продуктов. Результаты, полученные при исследовании изменения качества продукта с использованием методов органолептического отличия, дают полезную информацию о максимально возможной продолжительности хранения продукта (выявление конечной точки), но не рассматривают кинетику изменения качества. Органолептический контроль должен включать методы оценки скорости и степени изменения качества замороженных пищевых продуктов, учитывая изменения, которые могут сказываться на экономических показателях отрасли.

#### *10.2.2.2 Дескриптивные методы*

Дескриптивные (описательные) методы, основанные на словесном описании органолептических свойств продуктов, позволяют описать качество продукта и определить величины различий между образцами продуктов, применяя простые и сложные шкалы. К описательным методам относят профильный анализ и балловую систему оценки. Описательные методы используют точную терминологию, не допускающую разночтений. В программном балловом методе (метод органолептического рейтинга) широко применяют шкалы для количественной оценки качественных признаков продуктов. Эту оценку осуществляют специалисты-дегустаторы. Метод позволяет установить уровень частичного (по отдельным показателям) и полного (по комплексу показателей) качества. Результаты выражают в виде баллов условной шкалы с возрастающей последовательностью чисел, каждое из которых соответствует определенной интенсивности того или иного показателя качества. При использовании научно обоснованной балловой системы и соблюдении других основных требований метод балловой оценки позволяет получить достаточно объективные, надежные, хорошо воспроизводимые результаты. В практике органолептического анализа из-



вестны различные принципы построения балловых шкал. Существуют 3-, 5-, 7-, 9-, 10-, 13-, 30- и 100-балльные шкалы [VI].

В нормативно-технической документации (ГОСТы, ОСТы, ТУ) для большинства продуктов питания приводится лишь словесное описание органолептических показателей.

Современным требованиям наиболее полно отвечают 5-балльные шкалы с использованием коэффициентов весомости для отдельных показателей качества. Коэффициенты весомости показателей качества продукции являются количественной характеристикой значимости данного показателя качества продукции среди других показателей ее качества. Они выражают долевое участие признака в формировании качества продукта и служат множителями при расчете обобщенных балловых оценок [I].

Для назначения коэффициентов весомости применяются экспертные методы с групповым или индивидуальным опросом. Эксперты сравнивают между собой значимость единичных показателей, используя процедуры ранжирования, оценивания, парного и последовательного сравнения. Наиболее важными для пищевых продуктов являются вкус, запах, консистенция. Обычно вкусоароматическим показателям в шкалах отводят до 40–60% от общего количества баллов, консистенции — 20–25%. Сумма коэффициентов, как правило, равна 1. Коэффициенты весомости могут варьироваться в зависимости от вида продукта и цели исследования.

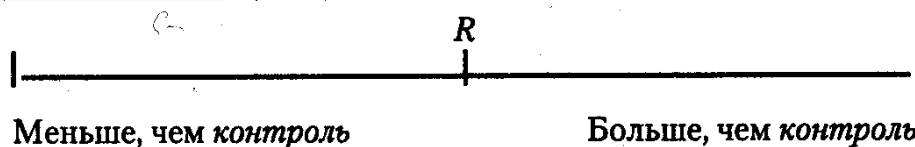
Для работы дегустаторов применяют 5-балльную шкалу, предусматривающую характеристику признаков продукта по пяти качественным уровням: 5 баллов – отличное качество; 4 – хорошее; 3 – удовлетворительное; 2 – плохое; 1 – очень плохое (технический брак).

Пяти баллам соответствует характеристика признаков эталона, который представляет высший (или мировой) уровень качества продукции. Оценкам 4 и 3 отвечают первая и вторая категории качества согласно требованиям стандарта на данное изделие.

Результаты дегустации каждого эксперта и всей группы экспертов статистически обрабатываются. При этом находится среднее арифметическое значение балловых оценок единичных показателей качества, стандартное отклонение, характеризующее однозначность оценок дегустаторов. Затем рассчитывается обобщенный показатель качества продуктов, представляющий собой сумму произведений оценок по единичным показателям на соответствующие коэффициенты весомости.

По результатам дегустаций пищевых продуктов составляются дегустационные листы (протоколы дегустаций), в которые вносятся балловые оценки единичных показателей качества, коэффициенты весомости и комплексный показатель качества. Затем по комплексному показателю качества определяют уровень качества по 5-балльной шкале и принадлежность продукта к соответствующей категории [VI].

Как правило, перед началом серии дегустаций дегустаторы участвуют в тренировке, проводимой так же, как и последующие дегустации. Образцы продукта, представленные на тренировочной дегустации, предварительно хранят при заданных условиях не менее двух недель. Целью тренировочной дегустации является ознакомление участников с бланками, видом шкал и способом представления проб. Имеются веские основания считать, что точность органолептической оценки возрастает с увеличением степени тренированности дегустаторов [2].



**Рис. 10.1.** Шкала отклонения от контрольных проб, используемая для оценки органолептических изменений определенных признаков качества при хранении в замороженном состоянии

Рекомендуется следующий порядок проведения дегустаций для оценки качества пищевых продуктов:

- 1) первая дегустация должна проводиться в день закладки продуктов на хранение;
- 2) в течение предполагаемого срока хранения должно быть проведено 4–6 дегустаций;
- 3) продолжительность исследования для установления прогнозируемого практического (реального) срока хранения (ПСХ) продукта для образцов, хранящихся при различных температурных условиях, должна быть минимальной;
- 4) интервал времени между дегустациями не должен быть слишком большим, чтобы не пропустить момент, когда различия признаков становятся значимыми;
- 5) в качестве контрольного должен использоваться продукт (образец), хранящийся при температуре  $-35^{\circ}\text{C}$  или ниже;
- 6) сравнению с контрольным образцом подлежит образец, хранящийся в рекомендованных условиях, и образец, хранящийся при заведомо неблагоприятных температурных условиях;
- 7) во время каждой дегустации все образцы исследуемого продукта, хранящиеся при различных температурных условиях, должны оцениваться одновременно.

Широкое распространение получило применение органолептического анализа с использованием шкалы отклонения от контрольных проб. В этом случае каждая проба оценивается в соответствии с ее отклонением от контрольного продукта по десятисантиметровой неструктурированной шкале с отметкой на концах «меньше, чем контроль» и «больше, чем контроль». Средняя точка шкалы обозначает интенсивность данного признака для контрольной пробы  $R$ , на шкале отмечаются изменения в интенсивности признака в большую или меньшую стороны (рис. 10.1). За контрольный может быть принят продукт, хранящийся при температуре  $-35^{\circ}\text{C}$  (при исследовании хранения в замороженном состоянии), поскольку общепринято, что при этой температуре происходит лишь незначительное изменение качества [18].

Если хранение в замороженном состоянии исследуется с помощью метода оценки по отклонениям от контрольных проб, то хранение при различных температурных условиях в начале исследования не должно вызывать значительных различий между пробами. Однако с увеличением продолжительности хранения (особенно при более высоких температурах хранения) различия между контрольной пробой и экспериментальными пробами будут становиться все более значительными (рис. 10.2). Это приведет к тому, что в ходе исследования будет зафиксирован момент, когда ор-

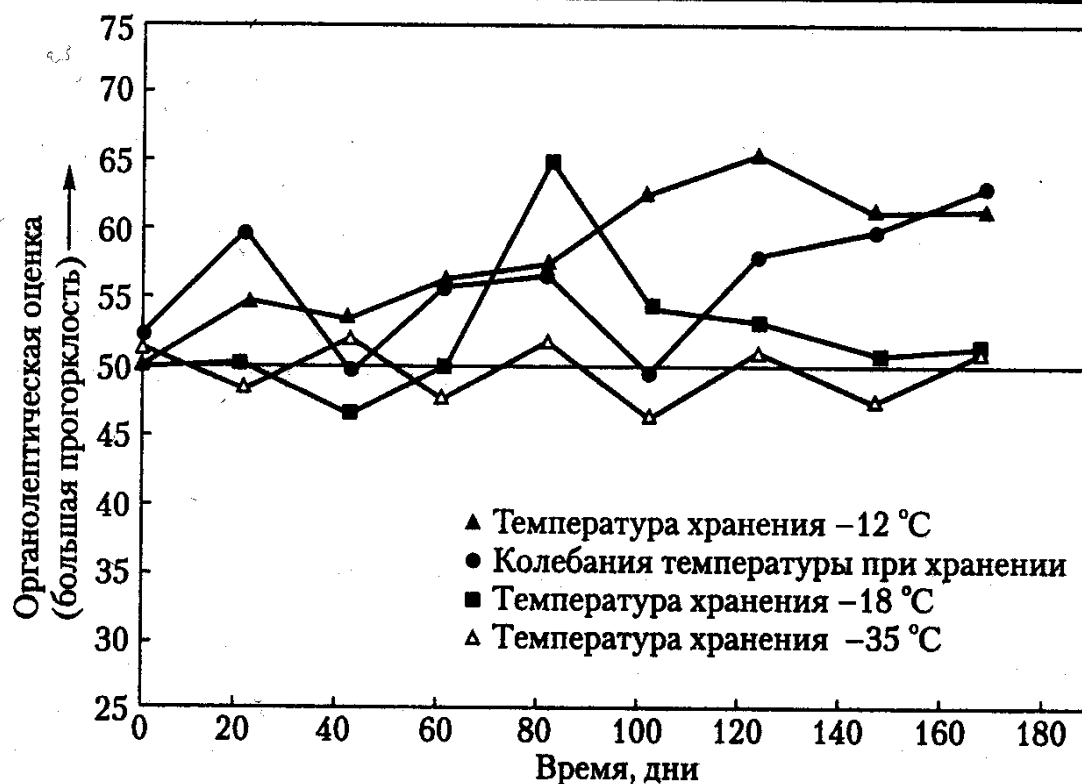


Рис. 10.2. Изменение прогорклости замороженных гамбургеров в зависимости от температуры хранения

ганолептические различия между рассматриваемыми образцами будут уверенно оцениваться как значимые. Гипотеза, лежащая в основе этого анализа, заключается в том, что время хранения, начиная с которого пробы продукта демонстрируют стабильно определяемые значимые отличия, связано с критерием срока годности.

В работе [40] приводятся результаты исследований замороженных продуктов, в которых с помощью шкалы отклонения определялась степень отклонения от значений контрольных проб для шести замороженных продуктов (клубника, горох, колбаса болонская копченая, гамбургер, мороженое и лососина). В течение всего периода исследований дегустации проводились каждые 3 недели 15 дегустаторами-добровольцами. Для получения объективных результатов дегустаторам не сообщали цель эксперимента и его подробности. Результаты, представленные дегустаторами, участвовавшими менее чем в половине проведенных дегустаций, не включали в анализ. Пробы, хранившиеся в различных условиях (контрольные, рекомендованные и жесткие температурные условия) предлагали дегустаторам в случайном порядке, указывалась только контрольная проба. Контрольные пробы имели маркировку «R», а каждая случайным образом предлагаемая проба кодировалась случайным четырехзначным числом. Изменения вкуса и структуры оценивались по двум экземплярам проб в отдельных кабинках при красном свете, а пробы, оценивавшиеся по внешнему виду, представлялись на подносах или в индивидуальных контейнерах при дневном свете.

Таким образом, дескриптивные методы, в частности метод органолептической рейтинговой оценки, применим для определения срока годности продукта и контроля органолептических изменений, используемых впоследствии для определения параметров прогнозирования качества.

## 10.2.3 Срок годности при хранении продуктов

Потеря желаемого признака качества пищевых продуктов (то есть нежелательное изменение качества) может быть оценено органолептически, эмпирически или аналитически. Например, определение химических компонентов, способствующих изменению в восприятии желательной характеристики, — типичный аналитический метод. Исследования, направленные на определение периода времени, необходимого для появления таких изменений качества замороженных продуктов, которые делают их неприемлемыми для употребления, послужили основой для установления критериев определения срока годности пищевых продуктов при хранении [8].

### 10.2.3.1 Стратегии определения срока хранения

Для прогнозирования органолептической приемлемости пищевых продуктов, хранящихся в замороженном состоянии, была предложена трехуровневая стратегия исследований [1]. Данный метод включал различение проб, рейтинговую оценку и оценку со стороны потребителей замороженных продуктов с относительно длительным сроком годности при хранении. Порог изменения качества определялся на основе тестирования на органолептическое различие проб. После обнаружения существенного различия (достижения порога) начиналась рейтинговая оценка отдельных признаков и приемлемости продукта в целом. Такой тип исследований приемлем при изучении пищевых продуктов с относительно длительным сроком хранения в замороженном состоянии.

Многие замороженные продукты не могут храниться в течение длительного времени без снижения качества. У таких продуктов обнаруживаемое снижение качества может произойти через несколько месяцев, особенно при отсутствии надлежащего контроля за температурой хранения, необходимого для поддержания наивысшего качества. Для изучения хранения таких продуктов использование методов, основанных на различии проб, невозможно, так как они не дают количественной оценки развития качественных изменений. Поскольку изменение качества определенных видов замороженных продуктов может быть очень быстрым, методы, основанные на различии проб, могут дать неоправданно завышенную продолжительность хранения при значительных различиях продуктов. Другим подходом является рейтинговая оценка признаков в начале исследований (возможно, включая использование одного или нескольких стандартных образцов) [43].

### 10.2.3.2 Критерий срока годности при хранении

Сохраняемость замороженных пищевых продуктов при хранении рассматривается на основе оценки срока годности продукта при хранении. Такие оценки предполагают, что 1) исходные продукты изначально имеют высокое качество, и 2) рекомендованная постоянная температура хранения поддерживается на всех этапах хранения и продажи [47]. Высокое качество с точки зрения высокого уровня желаемых (и низкого уровня нежелательных) характеристик качества поддерживается в ходе производства продукта путем тщательного выбора сырья и уделения должного внимания управлению технологическим процессом.

Срок годности продукта при хранении оценивается на основе: 1) учета изменений показателей качества продукта как реакции на известные внешние факторы (например, на температуру, влажность, упаковку и т. д.) и 2) задания критериев порчи продукта на основе какого-либо заметного различия качества между экспериментальной и контрольной пробами. В ходе изучения процесса хранения внешние факторы регулируются таким образом, чтобы они действовали на продукт постоянно, а критерии порчи основываются на органолептическом и аналитическом исследованиях. Когда отличия качества между экспериментальными и контрольными пробами могут регулярно определяться на статистически значимом уровне (при заданном числе обученных органолептическому анализу дегустаторов или по величине, определяемой приборами), продукт признается достигшим конца срока годности при хранении [44]. Уровень статистической значимости должен указывать на некоторое значимое различие, которое при поступлении продукта в торговлю могло бы иметь коммерческое значение.

К распространенным определениям срока годности для замороженных продуктов относятся следующие: порог чувствительности (*just noticeable difference, JND*), срок сохранения высокого качества (*high quality life, HQL*) и практический срок хранения (*practical storage life, PSL*). Эти определения подразумевают проверку органолептического различия проб и строгие статистические критерии определения потери годности при хранении. Обычно статистические критерии (или другие сравнительные анализы) применяются к количественно выраженным изменениям признаков качества продукта, зависящих от времени (например, срок хранения может быть определен через ожидание порчи продукта или отсутствия порчи). Таким образом, срок хранения продукта становится бинарной (двойной) мерой пригодности (или непригодности) продукта для потребления или другой цели.

Результаты исследований хранения в замороженном состоянии нашли свое отражение в литературе по пищевой науке в целом [9].

В качестве примера рассмотрим определение срока годности замороженных пищевых продуктов при хранении, приведенное в работах [40, 44].

Сравнение значений сроков хранения, полученных методом оценки отклонения от контрольных проб [40], со значениями, полученными разностными (дифференциальными) органолептическими методами [44], представлено в табл. 10.1. Данные по срокам хранения, представленные в работе [44], были получены с помощью метода органолептического различия проб. В работе сообщается, что сенсорный анализ позволил определить сроки хранения, необходимые для появления заметных отличий в качестве при различных температурных режимах хранения. Приведенные в работе заметные отличия относились к продукту в целом и не включали описание его специфических характеристик. Поскольку в работе [44] представлены результаты за несколько лет исследований, а в работе [40] — лишь при хранении менее 7 мес, то сравнению подлежат только данные, полученные при температуре хранения продуктов  $-12^{\circ}\text{C}$ .

Определение срока хранения в [40] рассматривается как диапазон, поскольку исследователи использовали номинальный 3-недельный интервал между оценками. Небольшие несоответствия в сравнении могут быть объяснены тем, что в [40] сравнивали продукт с температурой хранения  $-12^{\circ}\text{C}$  с продуктом, хранившимся при температуре  $-35^{\circ}\text{C}$ , а в [44] точные условия не были указаны. Кроме того, следует иметь в виду, что, хотя скорость изменения качества при  $-35^{\circ}\text{C}$  мала, заметные изменения

**Таблица 10.1. Сроки хранения замороженных продуктов, хранящихся при постоянной температуре**

	Температура, °C	JND 1 <sup>a</sup> (d)	Значительное различие <sup>b</sup> (d) <sup>b</sup>
Гамбургер <sup>г</sup>	-18	120	— <sup>д</sup>
	-12	80	82–103 (прогорклость)
Горох	-18	265	— <sup>д</sup>
	-12	120	130–148 (сладость)
Лососина	-18	60–90	— <sup>д</sup>
	-12	— <sup>е</sup>	— <sup>д</sup>
Клубника	-18	360	— <sup>д</sup>
	-12	60	42–65 (интенсивность красного цвета)

П р и м е ч а н и е: Органолептические признаки указаны в скобках.

<sup>a</sup> Порог чувствительности (*Just Noticeable Difference, JND*), оцениваемый по органолептическому анализу на различие проб [44];

<sup>b</sup> значимое различие, определенное по тесту отклонения от контрольных проб [40];  $p < 0,05$ ;

<sup>в</sup> приведенный диапазон в днях указывает последнюю дегустацию, показавшую незначимое отличие и первую дегустацию, показавшую значимое различие между пробами, хранящимися при -12 и -35 °C;

<sup>г</sup> гамбургер с 20%-ным добавлением гранулированной сои;

<sup>д</sup> за время изучения не наблюдалось стабильного значимого отличия;

<sup>е</sup> сравнимые данные отсутствуют.

через некоторый интервал времени тем не менее могут произойти. В целом, эти результаты означают, что методы органолептической оценки можно использовать для определения критериев срока хранения при изучении хранения замороженных продуктов. Такие методы не только позволяют удовлетворительно оценить срок хранения, но также дают возможность получить данные для кинетического анализа и прогнозирования изменения качества в сочетании с хорошо спланированным, статистически обоснованным экспериментом.

## 10.3 Моделирование изменений качества замороженных продуктов

### 10.3.1 Влияние температуры и продолжительности хранения на изменение качества замороженных продуктов

При снижении температуры хранения замороженных продуктов срок их годности увеличивается экспоненциально. На рис. 10.3 представлен график зависимости практи-

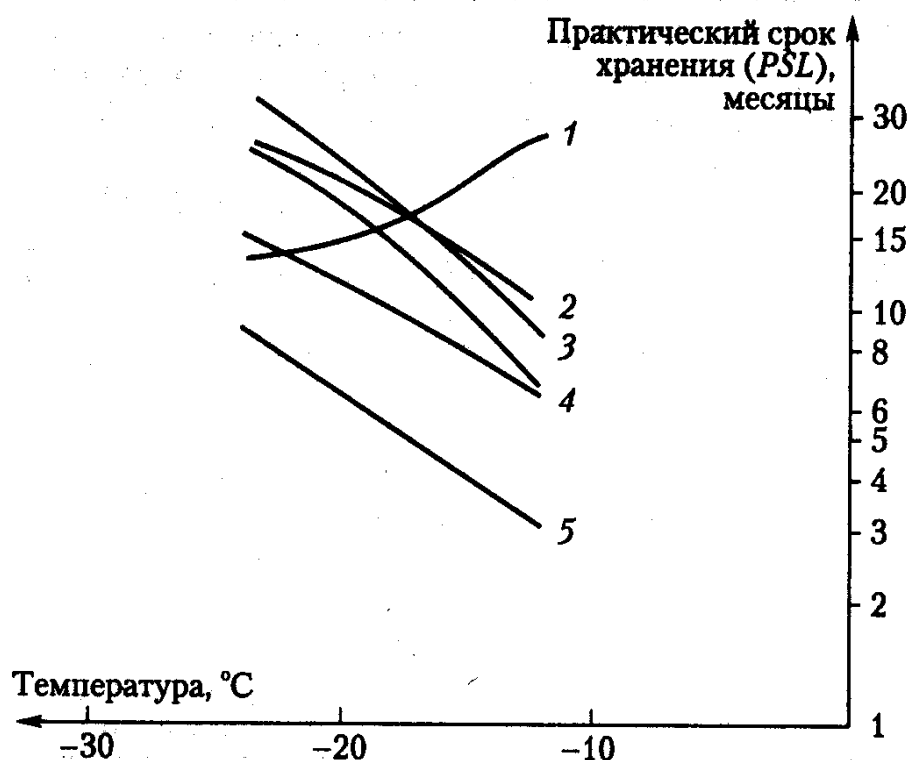


Рис. 10.3. Зависимость практического срока хранения (PSL) замороженных пищевых продуктов от температуры хранения

ческого срока хранения продукта от температуры хранения в полулогарифмических координатах, из которого следует, что для имеющего промышленное значение диапазона температур экспериментальные точки ложатся на прямую линию. Поэтому: 1) для каждого замороженного продукта существует соотношение между температурой хранения и временем, за которое при этой температуре произойдет определенная потеря качества продукта и 2) совместное влияние продолжительности хранения и температуры, ведущее к потере качества, необратимо и накапливается в течение всего срока хранения продукта.

Некоторые исключения из приведенных выше общих правил составляют:

- 1) эмульсии и коллоидные продукты, которые претерпевают повторный нагрев до температуры, близкой к температуре плавления (в таких случаях ухудшение не является строго арифметическим суммированием);
- 2) условия хранения с большими флуктуациями температуры (вызывающими большие внутренние температурные градиенты), что ведет к более высокой степени обезвоживания и сопровождается появлением так называемого морозного ожога);
- 3) продолжительное хранение замороженных продуктов при более высоких температурах, чем минимально необходимые для роста микроорганизмов (около  $-10^{\circ}\text{C}$ );
- 4) продукты, проявляющие обратную или нейтральную стабильность (более низкие температуры хранения сокращают срок годности при хранении или не изменяют его).

В работах [18, 44] рассмотрены результаты по исследованию сохраняемости замороженных продуктов при хранении. Полный обзор по сохраняемости свежих фруктов

и овощей, молочных и других охлажденных продуктов представлен в [21]. Важными факторами, влияющими на сохраняемость скоропортящихся продуктов, являются температура хранения, исходный состав и качество продуктов, методы обработки, способы упаковки и применяемые материалы [10, 11].

### 10.3.2 Подходы к кинетическому моделированию

Первоначально интерес к математическому моделированию процесса потери качества продуктов был вызван тем, что сроки хранения замороженных пищевых продуктов при постоянных температурах и в случае нарушения температурного режима отличаются даже при одинаковой средней температуре [14, 33]. Позднее интерпретации взаимосвязи между температурой хранения и качеством получили название — *кинетика срока хранения*. Среди этих интерпретаций — модели, использующие уравнение Аррениуса [13]; подход, аналогичный определению времени тепловой гибели [20] и метод добротности (*Q-value*) [31]. Разработана графическая интерпретация соотношения температуры хранения и изменения качества замороженных продуктов на основе использования индикаторов время–температура, контролирующих процесс хранения [48].

Подход к моделированию качества пищевых продуктов на основе химической кинетики обосновывается в работах [19, 29] как наиболее общая и широко применяемая математическая модель для описания влияния температуры на скорость потери качества. Основная характеристика кинетического подхода заключается в том, что скорость потери качества является экспоненциальной функцией, обратной абсолютной температуре (уравнение Аррениуса). Для успешного описания изменения качества пищевых продуктов в зависимости от температуры применимы также другие или модифицированные формы модели Аррениуса [25, 50].

#### 10.3.2.1 Математическая структура кинетической модели

Общая форма кинетической модели, описывающей зависящие от времени и температуры потери основного признака качества,  $Q$ , имеет вид:

$$-\frac{dQ}{dt} = k_0 \exp\left(-\frac{E_A}{R_g} \frac{1}{T}\right) Q^n. \quad (10.1)$$

Данная кинетическая модель имеет три неизвестных параметра  $n$ ,  $k_0$  и  $E_A$ , которые должны быть определены экспериментально. Порядок реакции  $n$  — это эмпирическая константа (обычно предполагается, что  $n$  — целое число), выбираемая из условия лучшего соответствия экспериментальным данным; множитель  $k_0$  представляет собой теоретическую скорость изменения признака качества за единицу времени;  $E_A$  — энергия активации, свидетельствующая о чувствительности наблюдаемого изменения качества к температуре. Процесс изменения качества большинства видов продуктов можно описать реакциями нулевого ( $n = 0$ ) или первого ( $n = 1$ ) порядков [21].



В условиях хранения при постоянной температуре математически кинетическую модель нулевого или первого порядка можно представить следующим образом:

$$-\frac{dQ}{dt} = k; \quad (10.2a)$$

$$-\frac{dQ}{dt} = kQ, \quad (10.26)$$

где уравнения (10.2a) и (10.26) обозначают реакции нулевого ( $n = 0$ ) или первого ( $n = 1$ ) порядка соответственно,  $k$  — константа скорости, характерная для реакции в определенных изотермических условиях. Аналитическое решение для уравнений (10.2a) и (10.26) можно найти разделением переменных, интегрированных в интервале от 0 до  $t$ . Полученные уравнения

$$Q = Q_0 - kt; \quad (10.3a)$$

$$\ln(Q) = \ln(Q_0) - kt, \quad (10.36)$$

имеют форму простой линейной модели с начальным уровнем признака качества, обозначенным  $Q_0$ . Уравнения (10.3a) или (10.36) могут быть использованы в регрессионном анализе оценки качества пищевых продуктов [ $Q$  или  $\ln(Q)$ ] от времени для получения константы скорости данной реакции.

Влияние температуры на скорость данной реакции может быть описано с помощью уравнения Аррениуса. Линейная форма этого уравнения:

$$\ln(k) = \ln(k_0) - \frac{E_A}{R_g} \frac{1}{T}. \quad (10.4)$$

Параметры  $E_A$  и  $k_0$  могут быть определены (косвенно по  $\ln k_0$  и  $E_A/R_g$ ) с помощью регрессионного анализа зависимости натурального логарифма скорости изотермической реакции от величины, соответствующей абсолютной обратной температуре (график Аррениуса). Чтобы правильно выполнить регрессионный анализ выражения Аррениуса, желательно иметь константы скорости для трех и более реакций, протекающих в изотермических условиях.

Подходы с двухступенчатой линейной и нелинейной регрессией для прогнозирования кинетических закономерностей приводятся в работах [3, 5, 12]. В [23] изложен метод определения значений энергии активации реакций, обуславливающих изменение качества ряда замороженных пищевых продуктов, по данным о сроках хранения при заданных температурах. В работе [21] приведены значения энергии активации реакций, лежащих в основе изменения качества различными охлажденными и полускорпортующимися продуктами.

### 10.3.3 Алгоритмы компьютерного моделирования

Раньше для прогнозирования изменения качества продуктов, хранящихся с нарушением температурного режима, исследователи использовали компьютерные алгорит-

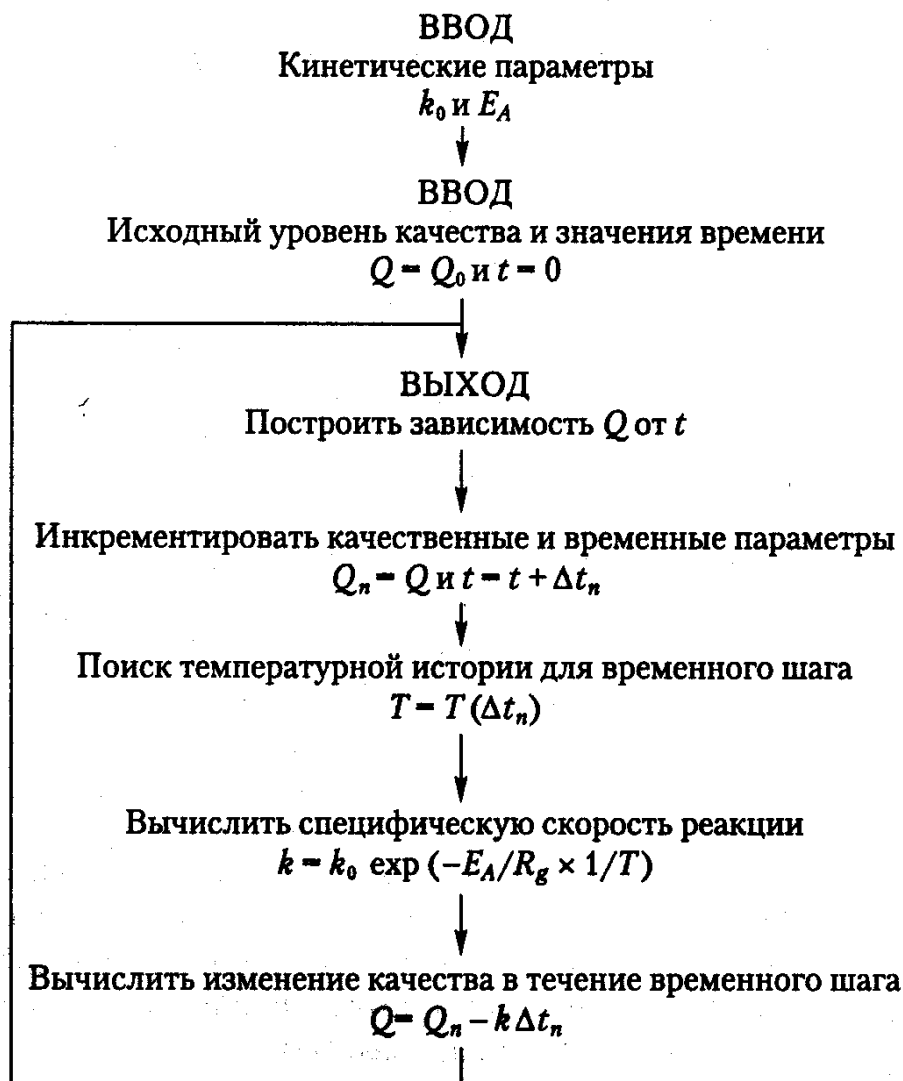


Рис. 10.4. Блок-схема общей структуры алгоритма компьютерного моделирования для прогнозирования изменения качества замороженных продуктов на основе кинетической модели нулевого порядка

мы [20, 29, 34]. Структура типичного алгоритма показана на рис. 10.4. Для прогнозирования изменения качества замороженных продуктов на основе моделирования совместного влияния температуры и продолжительности хранения в [34] представлен компьютерный алгоритм. На основании использования уравнения Аррениуса разработан способ оценки скорости изменения качества для небольшого шага вычислений в алгоритме прогнозирования. В работе [35] рассматривалась необходимость получения информации о кинетике изменения качества замороженных продуктов. Как возможный метод сбора этой информации было предложено использовать методы органолептической оценки, а именно метод отклонения от контрольных проб. В работе [45] представлена компьютерная программа (являющаяся частью компьютеризированной системы управления запасами) для прогнозирования изменения качества продуктов при определяемых пользователем температурных условиях.

Представленный на рис. 10.4 алгоритм облегчает расчеты изменения качества, основанные на данных фактического влияния температуры и продолжительности хранения на основании  $\Delta t_n$  и  $T(\Delta t_n)$ .

## 10.4 Управление запасами с точки зрения логистики

### 10.4.1 Накопление запасов

Запасы — это продукты, накопленные в результате различия складских потоков получаемых (в заказанном предприятием количестве) и отпускаемых товаров (в заказанном покупателем количестве). Часто количество запасов на складе (то есть имеющиеся в наличии запасы) рассматривается как количество хранящегося продукта, необходимое для удовлетворения потребностей различных покупателей в их динамике [26]. Теория управления запасами рассматривалась в литературе, посвященной науке о методах управления и последовательности операций. Порядок, в котором товары изымаются из запасов, рассмотрен в классической задаче исчерпания запасов, и процедура, с помощью которой принимается решение об отгрузке, определяется политикой управления запасами.

Такие продукты, как фрукты, овощи, мясо, выпечные изделия и др. для предотвращения порчи необходимо хранить в охлажденном состоянии, в связи с этим они относятся к группе скоропортящихся запасов. К ним относятся фотопленки (в них может произойти засвечивание до экспонирования), аккумуляторы (при хранении уменьшается их зарядная емкость), фармацевтическая продукция и кровь (со временем в них может произойти потеря биохимической активности) [26, 28]. Другим важным скоропортящимся товаром является валюта, о чем свидетельствует ежедневное изменение стоимости валют в международной торговле. Все скоропортящиеся товары нуждаются в какой-либо стратегии управления для продления срока их хранения и доставки из мест накопления запасов к потребителям с максимально сохраненными полезными свойствами (признаками качества), которые утрачиваются в результате порчи. Поскольку снижение качества замороженных продуктов продолжается даже при рекомендуемых температурах хранения (и ускоряется в результате флуктуаций температуры), они безусловно являются скоропортящимся товаром.

### 10.4.2 Управление запасами скоропортящихся товаров

Запасы замороженных пищевых продуктов продвигаются по транспортной цепочке (транспортной и складской сети), которая может охватывать склад краткосрочного хранения на перерабатывающем предприятии, перевозку на один или несколько централизованных складов и доставку в многочисленные розничные торговые точки (рис. 10.5). В процессе перемещения замороженных продуктов по транспортной цепочке возможно изменение их температуры. Замороженные продукты, хранящиеся при более низких температурах, отличаются более продолжительным сроком годности при хранении по сравнению с продуктами, хранящимися при более высоких температурах [18]. Иными словами, продукт, хранящийся при более низких температурах, оказывается в меньшей степени скоропортящимся. Если при хранении и транспортировке различных товаров температурные условия изменяются по-разному, то уровень их качества (относительная характеристика качества продукции, основанная на сравнении значений показателей качества оцениваемой продукции с

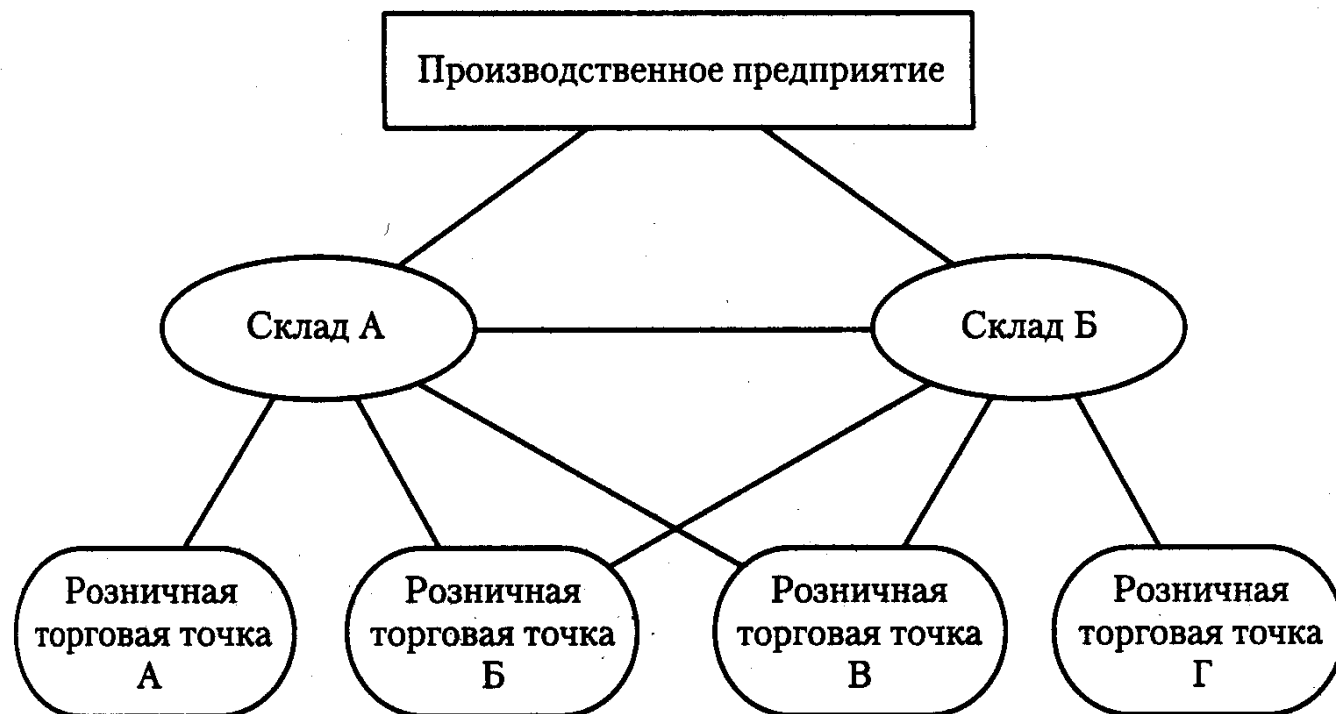


Рис. 10.5. Возможное движение замороженных продуктов по транспортной цепи (по [45])

базовыми значениями соответствующих показателей [1]) и ожидаемый срок годности будут различными даже при одинаковом «возрасте» товаров.

Существует неравномерность поступления товаров на склад и их отгрузки со склада, поэтому необходим контроль за движением товаров, который позволяет определить размеры имеющихся запасов, составить график их пополнения и очередности отгрузки. Разработка приемлемых критериев (стратегий) управления запасами для удовлетворения поступивших заказов на изделия может стать серьезной проблемой в производстве замороженных продуктов.

#### 10.4.2.1 Стратегии управления запасами

Для управления запасами скоропортящихся товаров существует три группы стратегий: 1) стратегии, основанные на удобстве, 2) стратегии, основанные на времени, 3) стратегии, основанные на качестве. Ниже приведено краткое описание этих групп.

##### 10.4.2.1.1 Стратегии, основанные на удобстве

Стратегии, основанные на удобстве, в качестве единственного критерия организации работы склада рассматривают исключительно удобство, включая «экономическое» удобство — выгоду. Целью такой политики может быть просто минимизация «хлопот», связанных с определением местонахождения продуктов в соответствии с какой-либо очередностью поставки или пополнения запасов. С другой стороны, цель управления запасами может быть основана на критериях наименьшей стоимости использования рабочей силы для удовлетворения заказов на данные продукт. Возможные стратегии управления запасами на основе удобства включают: 1) случайный выбор продукта (предполагается, что стратегия или приоритетность продуктов отсутствует) и 2) выбор «ближайших к двери продуктов» (предполагается, что приоритет при управлении запасами основан на трудозатратах и экономической эффек-

тивности). На практике вопросы удобства часто определяют решения, касающиеся управления запасами продуктов (особенно, если имеющийся склад характеризуется большим товарооборотом).

#### 10.4.2.1.2 Стратегии, основанные на времени

Стратегии, основанные на времени, устанавливают приоритетность отгрузки товаров со склада с учетом «возраста» продукта, определяемого как время с момента выпуска или как время хранения на складе. При равномерных графиках производства и сбыта время с момента выпуска товара будет близко времени поступления его на склад, поэтому обычно не делают различия между тем, как именно определяется «возраст» продукта. Возможны, в частности, две стратегии управления запасами на основе продолжительности нахождения продукта на складе: 1) «первым пришел — первым вышел» (*first in — first out, FIFO*), т. е. приоритет имеет продукт, хранящийся наиболее долго; 2) «последним пришел — первым вышел» (*last in — first out, LIFO*), т. е. приоритет имеет продукт самый «молодой» или появившийся в запасах последним. Стратегии управления запасами, основанные на времени, используют для установления критериев управления лишь определение возраста продукта.

#### 10.4.2.1.3 Стратегии, основанные на качестве

В основе стратегий, основанных на качестве, лежит минимизация изменчивости товаров в рамках требуемого их количества. Возможны, в частности, две стратегии управления запасами на основе качества: 1) оперативная поставка (*just-in-time, JIT*) и 2) выбор запасов по принципу наименьшего остающегося срока годности (*shortest remaining shelf-life, SRSL*). Использование философии управления, основанной на качестве, в условиях промышленного производства становится все более популярной [17]. Такая философия предполагает удовлетворение спроса на продукт (или его компонент) в момент его возникновения и на ожидаемом уровне качества. Например, стратегия *JIT* минимизирует (или исключает) необходимость в складских запасах путем удовлетворения заказа заданного размера за счет направления необходимого количества изделий непосредственно от производителя потребителю (т. е. своевременная доставка произведенной продукции для точного выполнения заказа заданного объема именно в нужное время). Это позволяет производителю минимизировать выпуск брака, который может вести к отказу от заказа (например, в случае порчи продукта), создавая ситуации, нарушающие общие графики потребления. Обычно стратегии управления запасами, основанные на качестве, неявно признают связи между планированием запасов и экономической эффективностью отрасли.

#### 10.4.2.2 Сравнение стратегий управления запасами

Концепция *FIFO* хотя и используется в промышленности замороженных пищевых продуктов, цель этой стратегии управления понимается неверно [4, 6, 27].

Концепция *FIFO* заключается не столько в поставке потребителю продукта высочайшего качества, сколько в минимизации изменения его качества. Реализация стратегии управления запасами на основе *LIFO* оптимальным образом обеспечивает высочайшее качество отпускаемого продукта, однако делается это без учета изменений

качества или устаревания постоянной составляющей запасов. Устаревание складских запасов увеличивает потери продукта и общие текущие расходы. Нарушение температурного режима и неправильное обращение с продуктами перед поступлением на склад мешают достижению целей стратегий управления запасами, основанных на времени, — обеспечению качества и его постоянства.

Стратегии управления запасами, основанные на качестве, реализуются благодаря использованию методов оценки скорости и степени изменения качества пищевых продуктов при изменении температуры хранения [22]. Контроль температуры в процессе хранения может быть использован для прогнозирования изменения качества и определения оставшегося срока годности продукта при условии поддержания рекомендованных температур хранения [46]. Знание оставшихся сроков годности позволит составить графики отпуска замороженных продуктов — в первую очередь отпускаются продукты с наименьшим сроком годности [45]. Стратегия *SRSI* (наименьшего остающегося срока годности) улучшает качество отпускаемых продуктов по сравнению со стратегиями, основанными на времени [47]. Стратегия *SRSI* в литературе также называется политикой управления запасами на основе минимального срока хранения (*least shelf-life first out, LSFO*) [42].

### 10.4.3 Управление запасами на основе оценки качества

Не следует ставить знак равенства между отсутствием контроля температуры при холодильном хранении и отсутствием контроля запасов замороженных продуктов. Тогда как важность температурного контроля при хранении и распределении пищевых продуктов общепризнана, стратегии управления, направленные на улучшение качества замороженных продуктов, касаются почти исключительно аспектов управления производством. На практике контроль запасов замороженных продуктов в основном сводится лишь к контролю температуры.

Управление качеством продукции в широком понимании включает действия, осуществляемые при создании, эксплуатации или потреблении продукции в целях установления, обеспечения и поддержания необходимого уровня ее качества [I, III].

Система управления качеством продукции — совокупность управляющих органов и объектов управления, взаимодействующих с помощью материально-технических и информационных средств при управлении качеством продукции [I, III]. Производители пищевых продуктов для производства и доставки продукции с постоянным и хорошим качеством используют различные стратегии управления качеством. К важнейшим из них относятся: 1) планирование и контроль качества продукции, 2) температурный контроль при хранении и 3) специальные процедуры обращения с изделиями и управляемую логистику складских запасов замороженных продуктов. Планирование качества продукции заключается в установлении обоснованных заданий по выпуску продукции с требуемыми значениями показателей качества на заданный момент времени или в течение заданного интервала времени. Контроль качества продукции — это проверка соответствия показателей качества продукции установленным требованиям [I, III].

Основными для статистического контроля качества являются регулярные замеры свойств (признаков) некоторой выборки проб [15]. Полученные результаты обоб-

щаются в виде среднего значения и дисперсии, которые наносятся по отдельности на график карты контроля качества. При использовании подобных методов контроля качества на производстве операторы установок (или менеджеры) сразу же видят, когда технологический процесс (или стратегия управления им) достигает заданного постоянного уровня качества.

Поскольку решения при управлении запасами замороженных продуктов зачастую определяются вопросами удобства логистики, имеются веские основания применять средства статистического контроля запасов. С помощью простого способа получения графиков зависимости оставшегося срока годности продукта от времени (срок годности минус «возраст» продукта), менеджеры получают объективную информацию об эффективности применяемых стратегий управления запасами. Такой метод в сочетании с периодическими проверками изделий, выборочным контролем температуры или отслеживанием мнений потребителей предоставляет необходимые средства диагностики для оценки необходимости реализации тех или иных стратегий управления запасами на основе качества.

#### *10.4.3.1 Прогнозирование остающегося срока годности при хранении*

Цель стратегии управления запасами — максимально увеличить общий срок годности хранящихся на складе изделий. При наличии запасов скоропортящихся товаров максимальное увеличение срока годности запасов на центральном складе позволяет повысить гибкость при сбыте на местные склады и удовлетворить спрос многочисленных потребителей. На крупных складах замороженных продуктов пополнение запасов может быть как регулярным (для изделий, вырабатываемых в течение всего года), так и периодическим (для сезонных продуктов), однако в ближайшем рассмотрении складские операции при работе более чем с одним «лотом» можно считать работой с запасами.

Остающийся срок годности некоторого продукта «из запасов» может быть выражен математически через разницу между текущим уровнем качества продукции (относительная характеристика качества продукции, основанная на сравнении значений показателей качества оцениваемой продукции с базовыми значениями соответствующих показателей) и его предельным значением (предельное значение показателя качества продукции — наибольшее или наименьшее регламентированное значение показателя качества продукции) или порогом (пороговым уровнем) качества. Поскольку данные о сроке годности указываются в стандарте на выпускаемую продукцию, можно определить значение порога качества для произвольного значения качества продукта. Так, для некоторого исходного значения  $Q_0$  (например,  $Q_0 = 100$ ) пороговое значение качества  $Q_{TH}$  может быть рассчитано для рекомендуемой температуры хранения  $t_{REF}$ . Использование кинетической модели изменения качества, учитывающей известное (или ожидаемое) влияние температуры и продолжительности хранения, позволяет прогнозировать тот или иной уровень качества продукции. Различные сочетания температуры и продолжительности хранения в различной степени снижают качество продуктов, которые можно сравнивать с точки зрения ожидаемых оставшихся сроков годности.

Предполагая, что изменение качества продуктов удовлетворительно моделируется на основе реакций нулевого порядка, формула для расчета оставшегося срока годности имеет следующий вид:

$$L(Q_n) = \frac{Q_n - Q_{TH}}{k_0 \exp\left(-\frac{E_A}{R_g} \frac{1}{T_{REF}}\right)}, \quad (10.5)$$

где  $L(Q_n)$  – максимальный остающийся срок годности продукта, хранящегося при постоянной рекомендуемой температуре  $T_{REF}$ ;  $Q_{TH}$  – пороговый уровень качества;  $Q_n$  – текущий уровень качества;  $T_{REF}$  – рекомендуемая температура хранения. Для определения текущего уровня качества ( $Q_n$ ) нужно знать фактический уровень качества, влияние температуры и продолжительности хранения, а также алгоритм компьютерного моделирования. Кроме того,  $Q_n$  можно установить с помощью индикаторов время–температура, коррелирующих с изменением качества продукта [46].

В тех случаях, когда поставки требуют продолжительного времени транспортировки, например, при длительных сухопутных или морских перевозках, оставшийся срок годности продукта  $L(Q_n)$  должен быть больше, чем время  $L(d_j)$ , необходимое для транспортировки этого продукта до места назначения  $j$ :

$$L(Q_n) > L(d_j). \quad (10.6)$$

Если несколько продуктов удовлетворяют указанному ограничению (формула 10.6), то для определения порядка отгрузки товаров со склада учитывается наименьший остающийся срок годности и продолжительность транспортировки.

#### 10.4.4 Экономический эффект управления запасами

Лучшим примером исследований, посвященных оценке экономического эффекта от применения стратегии управления запасами скоропортящихся изделий, являются работы в области производства древесной массы [30, 41]. Скипидар и талловое масло – ценные побочные продукты варки древесной щепы, но их выход снижается при длительном хранении щепы. Рассматривая экономические аспекты снижения выхода этих соединений в зависимости от управления запасами, в работе [41] было показано, что минимальные потери наблюдаются при использовании стратегии, приближающейся к оперативной поставке *JIT*, а в работе [30] – что стратегия, сочетающая *LIFO* и *FIFO* (комбинированная стратегия), минимизирует потери и обеспечивает поставку изделий с наиболее постоянными уровнями нужных соединений. Вывод, который позволяют сделать эти исследования, заключается в том, что стратегии управления запасами на основе качества минимизируют экономические потери скоропортящихся продуктов, стоимость которых зависит от количества и качества входящих в состав продукта соединений (компонентные признаки качества). В настоящее время экономическая ценность пищевых продуктов не определяется входящими в них компонентами, однако наложение штрафов за поставку продуктов, которые не соответствуют стандартам или не отвечают ожидаемым срокам годности при хранении, может изменить традиционный подход к стратегии управления запасами.



## Условные обозначения

$d_j$	Расстояние от места хранения запасов до места назначения, км
$E_A$	Энергия активации (кал/моль), элемент температурной характеристики
$k$	Удельная скорость реакции ( <i>specific reaction rate</i> ) для изотермических условий (органолептическая рейтинговая оценка/день или результат инструментального измерения/день)
$k_0$	Множитель, выраженный как скорость изменения признака качества за единицу времени (органолептическая рейтинговая оценка/день или результат инструментального измерения/день)
$L(d_j)$	Продолжительность транспортировки от места хранения запасов до места назначения $j$ , дни
$L(Q_n)$	Ожидаемый оставшийся срок годности для продукта, хранящегося при $T_{REF}$ и текущем уровне качества $Q_n(d)$
$n$	Порядок реакции (обычно безразмерная целая величина)
$Q$	Уровень признака качества (органолептическая оценка или результат инструментального измерения)
$Q_n$	Текущий уровень качества при прогнозируемом оставшемся сроке годности при хранении (органолептическая оценка или результат инструментального измерения)
$Q_0$	Исходный уровень качества (органолептическая оценка или результат инструментального измерения)
$Q_{TH}$	Уровень порога качества, соответствующий концу срока годности (органолептическая оценка или результат инструментального измерения)
$R_g$	Универсальная газовая постоянная (1,987 кал/моль К)
$t$	Время, дни
$T$	Абсолютная температура, К
$T_{REF}$	Эталонная или рекомендованная абсолютная температура хранения, К

## Глоссарий

**Порог чувствительности (JND)** (или *FND*) устанавливает, как долго продукт может храниться до обнаружения отличия в его качестве. *JND* определяет экспертная комиссия из специально подготовленных дегустаторов, которые могут обнаружить заметное отличие между экспериментальным и контрольным образцами, используя органолептическую оценку проб. Отличия определяются с учетом всех характеристик и не относятся к определенному признаку качества.

**Срок сохранения с высоким качеством (HQL)** «... Время между замораживанием продукта, имеющего первоначально высокое качество, и моментом, когда 70% опытных дегустаторов успешно отличат этот продукт от контрольного (который сохранялся при температуре  $-40^\circ\text{C}$  или ниже) с применением методики треугольника или двойного треугольника» (International Institute of Refrigeration, 1972).

**Практический срок хранения (PSL)** «... Практический срок хранения — это продолжительность хранения замороженного продукта, имеющего первоначально высокое качество, с момента замораживания до тех пор, пока он остается пригодным для потребления или обработки, для которой предназначен» (International Institute of Refrigeration, 1972).

## Дополнительная информация и ресурсы

American Frozen Food Institute  
1764 Old Meadow Ln., Suite 350  
McLean, VA 22102  
(703) 821-0770

Canadian Association of Warehousing and Distribution Services  
P.O. Box 125  
Oshawa, ON, CANADA L1H 7L1  
(416) 436-8801

Chilled Foods Association  
5775 Peachtree-Dunwoody Rd.,  
Atlanta, GA 30342  
(404) 252-3663

Food Institute of Canada  
130 Albert St. Suite 1409  
Ottawa, ON, CANADA K1P 5G4  
(613) 233-4049

Frozen Vegetable Council  
1838 E. Camino Real,  
Burlingame, CA 94010  
(415) 697-6835

International Association of Refrigerated Warehouses  
7315 Wisconsin Ave., #1200  
Nethesda, MD 20814  
(301) 652-5674

International Ice Cream Association  
888 16 St. NW  
Washington, D.C.  
20006 (202) 296-4250

National Food Processors Association  
1401 New York Ave. NW  
Washington, D.C. 20005  
(202) 639-5900

National Frozen Food Association, Inc.  
4755 Linglestown Rd., Ste. 300  
Harrisburg, Pa 17112  
(717) 657-8601

United Fresh Fruit & Vegetable Association  
727 N. Washington  
St. Alexandria, VA 22314  
(703) 836-3410

# Литература

1. Predicting acceptance of frozen foods stored for extended periods. Report No. 126 / Committee on Plant Products, Advisory Board on Military Personnel Supplies, Commission on Engineering and Technical Systems, National Research Council. — Washington, D. C.: National Academy Press, 1982.
2. Amerine, M. A., Pangborn, R. M., and Roessler, E. B. Principles of Sensory Evaluation of Food. — NY: Academic Press, 1965.
3. Arabshahi, A. and Lund, D. B. Considerations in calculating kinetic parameters from experimental data // J. Food Process Eng. — 1985. — № 7. — P. 239–251.
4. Bomberger, E. E. Optimal inventory depletion policies // Manage. Sci. — 1961. — № 7. — P. 294–303.
5. Gohen, E. and Saguy I. Statistical evaluations of Arrhenius model and its applicability in prediction of food quality losses // J. Food Process. Preservat. — 1985. — № 9. — P. 273–290.
6. Derman, C. and Klein, M. Inventory depletion management // Manage. Sci. — 1958. — № 4. — P. 450–456.
7. Dersosier, N. W. and Tressler, D. K. Fundamentals of Food Freezing. — Westport, CT: AVI Publishing, 1977.
8. Dethmers, A. E. Utilizing sensory evaluation to determine product shelf-life // Food Technol. — 1979. — № 34(11). — P. 40–42.
9. Dolan, K. D., Singh, R. P., and Wells, J. H. Evaluation of time-temperature related quality changes in ice cream during storage // J. Food Process. Preservat. — 1985. — № 9. — P. 253–271.
10. Fennema, O. R., Powire, W. D., and Marth, E. H. Low Temperature Preservation of Foods and Living Matter. — NY: Marcel Dekker, 1973.
11. Goodenough, P. W. and Atkin, R. K. Quality in Stored and Processed Vegetables and Fruits. — London: Academic Press, 1981.
12. Haralampu, S. G., Saguy, I., and Karel, M. Estimation of Arrhenius parameters using three least squares methods // J. Food Process. Preservat. — 1985. — № 9. — P. 129–143.
13. Heldman, D. R. and Lai, D. A model for prediction of shelf-life of frozen foods // IIR, Commission C2 Preprints, 16th International Congress of Refrigeration. — 1983. — P. 4217–433.
14. Hicks, E. W. Note on the estimation of the effect of diurnal temperature fluctuation on reaction rates in stored foodstuffs and other materials // J. Conuc. Sci. Ind. Res., Aust. — 1944. — № 17. — P. 111–114.
15. Hubbard, M. R. Statistical Quality Control for the Food Industry. — NY: Van Nostrand Reinhold, 1990.
16. Recommendations for the Proceession and Handling of Frozen Foods. — 2nd ed. / International Institute of Refrigeration. — Paris: IIR, 1972.
17. Kanban Just-In-Time at Toyota: Management Begins at the Workplace. — Rev. ed. / Japan Management Association; Lu, D. J., trans. — Tokyo: JMA, 1993.
18. Jul, M. The Quality of Frozen Foods. — NY: Academic Press, 1984.
19. Kwolek, W. F. and Brookwalter, G. N. Prediction storage stability from time-temperature data // Food Technol. — 1971. — № 25(10). — P. 1025.
20. Labuza, T. P. A theoretical comparison of losses in food under fluctuating temperature sequences // J. Food Sci. — 1979. — № 44(5). — P. 1162–1168.
21. Labuza, T. P. Shelf-Life Dating of Foods. — Westport, CT: Food and Nutrition Press, 1982.
22. Labuza, T. P. Application of chemical kinetics to deterioration of food // J. Chem. Educ. — 1984. — № 61(4). — P. 348–358.
23. Lai, D. and Heldman, D. R. Analysis of kinetics of quality change in frozen foods // J. Food Process. Eng. — 1982. — № 6. — P. 179–200.
24. Meilgaard, M., Civille, G. V., and Carr, B. T. Sensory Evaluation Techniques. — 2nd ed. — Boca Raton, FL: CRC Press, 1991.

25. Moreno, J. Quality deterioration of refrigerated foods and its time-temperature mathematical relationships // *Int. J. Refrig.* — 1984. — № 7(6). — P. 371-376.
26. Nahmias, S. Perishable inventory theory: a review // *Operat. Res.* — 1982. — № 30. — P. 680-708.
27. Pierskalls, W. P. and Roach, C. D. Optimal issuing policy for perishable inventory // *Manage Sci.* — 1972. — № 18. — P. 603-614.
28. Prastacos, G. P. Blood inventory management: an overview of theory and practice // *Manage Sci.* — 1984. — № 30. — P. 777-800.
29. Saguy, I. and Karel, M. Modeling of quality deterioration during food processing and storage // *Food Technol.* — 1980. — № 34(2). — P. 78-85.
30. Schmidt, R. L. The effect of wood chip inventory rotation policies on storage cost, chip quality, and chip variability // *TAPPI J.* — 1990. — № 73(11). — P. 211-216.
31. Schubert, H. Criteria for the application of T-TI indicators to quality control of deep frozen products // *Sci. Techn. Froid IIF-IIR.* — 1977. — № 1. — P. 407-423.
32. Schutz, H. C., Damrell, J. D., and Locke, B. H. Predicting hedonic rating of raw carrot texture by sensory analysis // *J. Texture Stud.* — 1972. — № 3. — P. 227-232.
33. Schwimmer, S., Ingraham, L. L., and Hughes, H. M. Temperature tolerance in frozen food processing: effective temperatures in thermal fluctuating systems // *Ind. Eng. Chem.* — 1955. — № 47(6). — P. 1149-1151.
34. Singh, R. P. Computer simulation of food quality during frozen food storage // *Int. Instit. Refrig. Bull. Supp.* — 1976. — № 1. — P. 197-204.
35. Singh, R. P. and Heldman, D. R. Quality changes in frozen foods: Presented at the 1983 Winter Meeting of the American Society of Agricultural Engineers. — Chicago, 1983. — (ASAE Paper No. 83-6510).
36. Singh, R. P. and Wang, C. Y. Quality of frozen foods — a review // *J. Food Process. Eng.* — 1977. — № 1. — P. 97-127.
37. Singh, R. P. and Wells, J. H. Use of time-temperature indicators to monitor quality of frozen hamburger // *Food Technol.* — 1985. — № 39(12). — P. 42-50.
38. Singh, R. P. and Wells, J. H. Keeping track of time and temperature // *Meat Process.* — 1986. — № 25(5). — P. 41-42, 46-47.
39. Singh, R. P. and Wells, J. H. Monitoring quality changes in stored frozen strawberries with time-temperature indicators // *Int. J. Refrig.* — 1987. — № 10(5). — P. 296-300.
40. Singh, R. P., Wells, J. H., Dolan, K. D., Gonnet, E. J., and Munoz, A. M. Critical evaluation of time temperature indicators for monitoring quality changes in stored subsistence: Report prepared for United States Army Natick Research & Development Center. — Natick, MA, 1984.
41. Springer, E. L. An economic comparison of chip storage methods // *TAAPI J.* — 1979. — № 62(9). — P. 39-42.
42. Taoukis, P. S., Fu, B., and Labuza, T. P. Time-temperature indicators // *Food Technol.* — 1991. — № 45(10). — P. 70-82.
43. Tarver, M. and Schinck, A. M. Statistical development of objective quality scores for evaluation the quality of food products // *Food Technol.* — 1958. — № 12(3). — P. 127-131.
44. Van Arsdel, W. B., Coply, M. J., and Olson, R. L. Quality and Stability of Frozen Foods. — NY: Wiley-Interscience, 1969.
45. Wells, J. H. A computer-based inventory management system for perishable foods: Eng. D. dissertation. — Davis, CA: University of California, 1987.
46. Wells, J. H. and Singh, R. P. A kinetic approach to food quality prediction using full-history time-temperature indicators // *J. Food Sci.* — 1988. — № 53(6). — P. 1866-1871, 1893.
47. Wells, J. H. and Singh, R. P. A quality-based inventory issue policy for perishable foods // *J. Food Process. Preservat.* — 1989. — № 12. — P. 271-292.
48. Wells, J. H., Singh, R. P., and Noble, A. C. A graphical interpretation of time-temperature related quality changes in frozen food // *J. Food Sci.* — 1987. — № 52(2). — P. 436-439, 444.
49. Wills, R. B. H., Lee, T. H., Graham, D., McGlasson, W. B., and Hall, E. G. Postharvest. — Westport, CT: AVI Publishing, 1981.

50. Zhao, Y., Wells, J. H., and Marshall, D. L. Description of log phase growth for selected microorganisms during modified atmosphere storage // J. Food Process Eng. — 1992. — № 15. — P. 299–317.

## Дополнительная отечественная литература

- I. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия, термины и определения. — М.: Госстандарт, 1990. — 26 с.
- II. Окрепилов В. В. Управление качеством. — М.: Экономика, 1998. — 639 с.
- III. Окрепилов В. В. Словарь терминов и определений в области экономики и управления качеством. — СПб.: Наука, 1999. — 214 с.
- IV. Окрепилов В. В. Всеобщее управление качеством. Законодательные и нормативные документы. Кн. 3. — СПб.: Изд-во СПбУЭФ, 1996. — 211 с.
- V. Окрепилов В. В. Всеобщее управление качеством. Защита прав потребителей. Кн. 4. — СПб.: Изд-во СПбУЭФ, 1996. — 211 с.
- VI. Родина Т. Г., Вукс Г. А. Дегустационный анализ продуктов. — М.: Колос, 1994. — 192 с.

# 11 ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ И РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

*Мартин Дж. Урбикэн и Хорхе Э. Лозано*

*Перевод А. Рапопорт под науч. ред. д-ра техн. наук, проф. А. С. Федорова*

## Содержание

- 11.1 Введение
- 11.2 Теплофизические свойства
  - 11.2.1 Теплопроводность
    - 11.2.1.1 *Теоретические и полуэмпирические модели теплопроводности пищевых продуктов*
    - 11.2.1.2 *Методы измерения теплопроводности*
    - 11.2.1.3 *Средства измерения*
  - 11.2.2 Температуропроводность
    - 11.2.2.1 *Измерение температуропроводности*
  - 11.2.3 Удельная теплоемкость
    - 11.2.3.1 *Измерение удельной теплоемкости*
  - 11.2.4 Плотность и удельный вес
    - 11.2.4.1 *Измерение плотности*
  - 11.2.5 Уравнения для прогностических целей
    - 11.2.5.1 *Жидкости, растворы и взвеси (суспензии)*
      - 11.2.5.1.1 *Соки*
    - 11.2.5.2 *Мясные продукты*
    - 11.2.5.3 *Пористые пищевые продукты*
    - 11.2.5.4 *Крупы, мука, макаронные и мучные изделия*
    - 11.2.5.5 *Замороженные пищевые продукты*
    - 11.2.5.6 *Животные и растительные жиры и масла*
    - 11.2.5.7 *Прочие продукты*
- 11.3 Реологические свойства
  - 11.3.1 Основные понятия

- 11.3.2 Жидкие и полужидкие пищевые продукты
- 11.3.3 «Ньютоновские» пищевые продукты
- 11.3.4 «Неньютоновые» пищевые продукты
  - 11.3.4.1 *Неньютоновые пищевые продукты со свойствами, не зависящими от продолжительности сдвига*
  - 11.3.4.2 *Неньютоновые пищевые продукты со свойствами, зависящими от продолжительности сдвига*
- 11.3.5 Полутвердые пищевые продукты
  - 11.3.5.1 *Модуль ползучести*
  - 11.3.5.2 *Релаксация напряжений*
- 11.3.6 Динамические свойства пищевых продуктов
- 11.4 Прогнозирование и корреляция реологических свойств
  - 11.4.1 Пищевые продукты ньютоновского типа
  - 11.4.2 Вязкость растворов и некоторых пищевых систем
  - 11.4.3 «Неньютоновые» пищевые продукты
    - 11.4.3.1 *Модели, независимые от времени*
    - 11.4.3.2 *Модели, зависящие от времени*
  - 11.4.4 «Полутвердые» пищевые продукты
  - 11.4.5 Пищевые продукты — гели
  - 11.4.6 Зависимость реологических параметров пищевых продуктов от температуры и давления
- 11.5 Измерение вязкости и реометрия
  - 11.5.1 Вискозиметры с капиллярной трубкой
  - 11.5.2 Вискозиметры с падающим шариком
  - 11.5.3 Ротационные вискозиметры
  - 11.5.4 Реометры
  - 11.5.5 Приборы, имеющиеся на рынке
- 11.6 Реологические свойства пищевых продуктов
  - 11.6.2 Пищевые продукты, характеризующиеся неньютоновым поведением
  - 11.6.3 Текстура пищевых продуктов
  - 11.6.4 Измерение текстуры при помощи «нефундаментальных» методов

Список обозначений

Значения индексов

Значения греческих символов

Литература

## 11.1 Введение

Физические свойства материала — это такие свойства, характеристики которых можно измерить физическими методами. Эти характеристики зависят от состава материала, его физического состояния и условий, в которых они были определены.

Инженеру, проектирующему технологию и технологическое оборудование для переработки пищевых продуктов, необходимо знать свойства перерабатываемых материалов. Найти необходимые данные, как правило, достаточно сложно, поскольку спектр пищевых материалов чрезвычайно широк, а их характеристики зависят от большого числа факторов. В этих условиях зачастую наилучшим решением является экспериментальное определение тех или иных параметров.

Теплофизические и реологические характеристики описывают важнейшие физические свойства пищевых продуктов.

## 11.2 Теплофизические свойства

Теплофизические свойства материала обуславливают сохранение тепловой энергии в массе материала, ее распространение по его объему, а также те изменения, которые происходят в материале под действием нагрева или охлаждения. Это общее определение может быть отнесено и к пищевым продуктам. Обычно к теплофизическим свойствам относят теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость и плотность или удельный вес материала. Они зависят от температуры, химического состава и физической структуры материала. Пищевые продукты — это, как правило, сложные композитные материалы, состоящие из многих компонентов. Эффективные значения величин, характеризующих свойства композита, можно получить осреднением характеристик свойств их компонентов, выполняемым по некоторым правилам, которые зависят от особенностей строения изучаемого материала. В этом смысле пищевые материалы могут быть представлены как многокомпонентные субстанции трех уровней сложности.

На первом самом простом для анализа уровне пищевой продукт рассматривается как однофазная, сплошная однородная среда, образованная из очень мелких частиц различного химического состава: белков, жиров, углеводов, клетчатки, воды и прочих компонентов. В такой модели при вычислении эффективных характеристик среды вклады отдельных компонентов осредняются с весовыми коэффициентами, пропорциональными массовым или объемным долям компонента в продукте.

На втором более сложном уровне рассматриваются продукты, содержащие дисперсные газообразные или жидкие компоненты, — обычно воздух и воду. На этом уровне рассматривают пористые продукты, суспензии, муку, порошки, пылевидные продукты. В этом случае необходимо учитывать не только объемные доли каждой фазы, но и их расположение в пространстве, вводя некоторые коэффициенты распределения.

И, наконец, на третьем уровне продукты рассматриваются как композитные материалы, состоящие из существенно разнородных компонентов. В эту группу входят все виды консервированных или фасованных продуктов, мучные кондитерские изделия, конфеты и широкий спектр полуфабрикатов. Для построения прогностических моделей таких продуктов требуется информация о средних или эффективных характеристиках компонентов и физической структуре материала.

Теплофизические характеристики зависят от температуры, поскольку такая зависимость существует для свойств отдельных компонентов. Для пористых материалов, кроме того, необходимо учитывать, что от температуры может зависеть степень пористости или содержание воды. Поскольку вода может находиться в жидкой или твердой фазе, замораживаемые продукты требуют отдельного анализа.

Хотя имеющаяся информация о свойствах пищевых продуктов неполна, по некоторым видам продуктов существует огромное количество данных. Они иногда противоречивы, поскольку получены в разных условиях для продуктов разного происхождения, состава и структуры, и поэтому по мере возможности будут представлены не числовые табличные величины, описывающие теплофизические свойства тех или иных продуктов, а корреляционные формулы, связывающие характеристики этих свойств с определяющими параметрами, — температурой, пористостью, содержанием



ем влаги. На основе этих зависимостей могут быть построены методики прогнозирования свойств. Большое внимание будет уделено теории и методам измерений, обеспечивающих прогнозирование необходимой числовой информацией.

### 11.2.1 Теплопроводность

В этом разделе представлены теоретические и полуэмпирические модели, применяемые для прогнозирования теплопроводности материалов.

Отличительным свойством тепловой энергии является ее способность распространяться через материальную среду. Протекающий через среду тепловой поток характеризуется вектором, направление которого совпадает с направлением, в котором переносится тепло, а длина равна энергии, которая за единицу времени пересекает единичную площадку, перпендикулярную этому направлению (измеряется в Дж/(м<sup>2</sup> · с)). Тепловой поток течет от горячей области среды к холодной; его величина пропорциональна перепаду температур. В соответствии с законом Фурье тепловой поток пропорционален градиенту температуры:

$$q = -k \frac{dT}{dz}, \quad (11.1)$$

где  $q$  – тепловой поток;  $T$  – температура в данной точке;  $z$  – расстояние, измеряемое в направлении теплового потока;  $k$  – коэффициент теплопроводности материала; знак минус отражает тот факт, что вектор теплового потока направлен противоположно вектору градиента температуры, то есть в сторону ее понижения.

Таким образом, коэффициентом теплопроводности материала называют коэффициент пропорциональности между тепловым потоком и градиентом температуры. В физическом смысле он характеризует количество тепла, проходящего за единицу времени через единичную площадку под действием движущей силы, вызванной единичным градиентом температуры. Теплопроводность является важным внутренним свойством каждого материала.

#### 11.2.1.1 Теоретические и полуэмпирические модели теплопроводности пищевых продуктов

Для прогнозирования теплопроводности продуктов питания используются методы, которые были первоначально разработаны для других совершенно несъедобных материалов – грунтов, керамики, полимеров и т. п. с похожими особенностями строения. Методы исследования направлений тепловых потоков в анизотропных волокнистых композитных материалах могут быть применены к волокнистым пищевым продуктам (мясо, некоторые овощи, суспензии и т. д.).

Эмпирические зависимости коэффициентов теплопроводности от температуры и химического состава для многих продуктов будут приведены ниже. Теоретические модели носят более общий характер, но требуют знания топологии материала – пространственного распределения его компонентов. Кроме того, некоторые модели, основанные на теории, по сути являются полуэмпирическими, так как содержат параметры, которые для каждого конкретного продукта должны быть подобраны на основе экспериментальных измерений.

Самые простые модели, в которых предполагается, что отдельные компоненты материала расположены слоями, параллельными или перпендикулярными к направлению теплового потока, приводят к формулам, основанным на аналогии тепло- и электропроводности.

*Последовательная модель.* В модели, слои компонентов которой расположены перпендикулярно тепловому потоку, суммируются тепловые сопротивления слоев, то есть величины, обратные теплопроводностям. Эффективный коэффициент теплопроводности может быть рассчитан по формуле

$$k = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{\phi_i}{k_i}}, \quad (11.2)$$

где  $k_i$  — индивидуальный коэффициент теплопроводности  $i$ -го компонента;  $\phi_i$  — его объемная доля.

В работе [4] последовательная модель рекомендуется как лучшая для предсказания свойств квазиоднородных пищевых материалов — например мяса как в замороженном, так и в незамороженном состояниях.

*Параллельная модель.* Слои компонентов расположены параллельно направлению теплового потока. В этом случае суммируются теплопроводности. Эффективный коэффициент теплопроводности рассчитывается по формуле

$$k = \sum_{i=1}^N k_i \phi_i. \quad (11.3)$$

*Модели со случайным распределением слоев.* Они носят более общий характер, поскольку не связаны с вышерассмотренными особенностями расположения слоев. Принимается, что материал существует в виде некоторой непрерывной фазы, в которую другие фазы вкраплены в виде дискретных частиц различной формы и размеров. Такие модели разработаны для расчета электропроводности, но успешно применялись и к теплопроводности гетерогенных пищевых материалов.

В специальной литературе можно найти различные теоретические и полуэмпирические формулы, которые могут быть успешно применены к конкретным заданным сочетаниям компонентов и условий, однако ни одна из них не применима ко всем системам. Некоторые из формул приведены ниже для общего понимания предмета, и их применение должно быть подкреплено экспериментальными данными.

Модель с переменным коэффициентом распределения, предложенная в работе [47] для предсказания эффективной теплопроводности порошков, муки и пылевидных веществ, объединяет последовательные и параллельные модели. Предполагая, что в гетерогенном материале (в пористых продуктах) твердая фракция и поры распределены случайным образом, автор приходит к линейной комбинации формул для перпендикулярного и параллельного расположения компонентов:

$$\frac{1}{k} = \frac{1-f}{(1-\varepsilon)k_s + \varepsilon k_g} + f \left[ \frac{1-\varepsilon}{k_s} + \frac{\varepsilon}{k_g} \right], \quad (11.4)$$

Таблица 11.1. Коэффициенты для расчета параметров  $A_i$  уравнения 11.5

	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$
$a$	0,44735	-2,22601	-1,83405	-0,394814
$b$	0,873233	14,3434	-0,619566	-5,44528
$c$	-0,43634	-25,5292	75,18500	53,41450
$d$	2,18646	9,22053	53,01440	-41,87700

По [72].

где  $k_s = Sw_i k_i$  для  $i = 1, \dots, N - 1$  (не учитывается воздух);  $w_i$  – массовая доля  $i$ -го компонента;  $\varepsilon$  – пористость;  $k_g = k_{\text{возд}}$ ;  $f$  – коэффициент, учитывающий пространственное распределение пор и твердого вещества (для последовательного расположения компонентов  $f = 0$ , а для чисто параллельного  $f = 1$ ).

По уравнению (11.4) вычисляются промежуточные значения, соответствующие реальному пространственному расположению теплопроводящих компонентов. В работе [72] коэффициент  $f$  представлен полиномом третьей степени по параметру пористости  $\varepsilon$ , полиномиальные коэффициенты которого – полиномы по содержанию влаги  $X$ :

$$f = A_1 + A_2(\varepsilon - 0,4) + A_3(\varepsilon - 0,4)^2 + A_4(\varepsilon - 0,4)^3, \quad (11.5)$$

и

$$A_i = a + b\xi + c\xi^2 + d\xi^3,$$

где  $\xi = X$  для  $i = 1$  и  $2$ ,  $\xi = (X - 0,25)$  для  $i = 3$ ,  $\xi = (X - 0,1627)$  для  $i = 4$ . Значения коэффициентов  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$  для различных  $A_i$  приведены в табл. 11.1.

В работе [19] представлены экспериментальные результаты по таким теплофизическим свойствам, как теплопроводность, температуропроводность, плотность, удельная теплоемкость. Предложены модели, учитывающие массовые доли основных компонентов (белков, жиров, углеводов, клетчатки, золы и воды). Свойства каждой из субстанций описаны квадратичными или линейными функциями температуры.

Плотность и удельная теплоемкость непосредственно зависят от массовых долей компонентов  $w_i$ . Теплопроводность и температуропроводность зависят от пространственной структуры материала и определяются объемными долями  $\phi_i$ , вычисляемыми через массовые, которые легче измерить, и плотности  $\rho_i$  по уравнению:

– объемные доли компонентов

$$\phi_i = \frac{\frac{w_i}{\rho_i}}{\sum \frac{w_i}{\rho_i}}; \quad (11.6)$$

– коэффициент температуропроводности

$$\alpha = \sum \alpha_i w_i; \quad (11.7)$$

– плотность

$$\rho = \frac{1}{\sum \frac{w_i}{\rho_i}} ; \quad (11.8)$$

– удельная теплоемкость

$$c_p = \sum c_{p_i} w_i ; \quad (11.9)$$

– водная фракция (в незамороженном состоянии)

$$\frac{\lambda}{R} \left[ \frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_i} \right] = \ln \left[ \frac{\frac{w_w}{M_w}}{\frac{w_w}{M_w} + \sum \frac{w_i}{M_i}} \right] . \quad (11.10)$$

Уравнения, предложенные в [19] для оценки коэффициентов теплопроводности  $k$ , температуропроводности  $\alpha$ , плотности  $\rho$  и удельной теплоемкости  $c_p$  основных компонентов пищевых продуктов, приведены в табл. 11.2.

Одна из самых простых моделей предложена в работе [124]. Она основана на взвешенном среднем геометрическом значении компонентов с использованием в качестве весовых коэффициентов их объемной доли. Она проста в применении и пригодна для широкого набора условий, так как отражает хаотическую природу случайным образом распределенных компонентов:

$$k = \prod k_i^{\phi_i} . \quad (11.11)$$

Другая модель того же типа предложена Льюисом и Нильсеном [57]; в работе [96] она признана пригодной для определения коэффициентов теплопроводности томатной пасты с различным содержанием влаги. Ей соответствует следующее уравнение:

$$k = k_c \frac{1 + AB\phi}{1 - B\phi\psi} , \quad (11.12)$$

где  $k_c$  и  $k_d$  – коэффициенты теплопроводности непрерывной и дисперсной фазы соответственно,  $\phi$  – объемная доля дисперсной фазы, а  $B$  и  $\psi$  – параметры, зависящие от содержания воды, причем

$$B = \frac{k_d - k_c}{k_d + Ak_c} . \quad (11.13)$$

$A$  и  $\chi_m$  – эмпирические константы, учитывающие тип, форму и ориентацию диспергированных частиц. Их значения, рассчитанные в [57], приведены в табл. 11.3.

В знаменитой работе Максвелла «Трактат об электричестве и магнетизме» (1873) [65] была исследована электропроводность композитного материала, состоящего из

Таблица 11.2. Теплофизические свойства основных компонентов пищевых продуктов как функции температуры

Свойство	Основной компонент	Уравнение
$k$ (Вт/(м·°C))	Углевод	$k = 0,20141 + 1,387410^{-3}T - 4,331210^{-6}T^2$
	Зола	$k = 0,32962 + 1,401110^{-3}T - 2,906910^{-6}T^2$
	Клетчатка	$k = 0,18331 + 1,249710^{-3}T - 3,168310^{-6}T^2$
	Жир	$k = 0,18071 + 2,760410^{-4}T - 1,774910^{-7}T^2$
	Белок	$k = 0,17881 + 1,195810^{-3}T - 2,717810^{-6}T^2$
	Вода	$k_A = 0,57109 + 1,762510^{-3}T - 6,703610^{-6}T^2$
	Лед	$k_H = 2,2196 - 6,248910^{-3}T + 1,015410^{-4}T^2$
$\alpha$ (м <sup>2</sup> /с) × 106	Углевод	$\alpha = 8,084210^{-2} + 5,305210^{-4}T - 2,321810^{-6}T^2$
	Зола	$\alpha = 1,246110^{-1} + 3,732110^{-4}T - 1,224410^{-6}T^2$
	Клетчатка	$\alpha = 7,397610^{-2} + 5,190210^{-4}T - 2,220210^{-6}T^2$
	Жир	$\alpha = 9,877710^{-2} + 1,256910^{-4}T - 3,828610^{-8}T^2$
	Белок	$\alpha = 6,871410^{-2} + 4,757810^{-4}T - 1,464610^{-6}T^2$
	Вода	$\alpha_A = 0,1317 + 6,247710^{-4}T - 2,402210^{-6}T^2$
	Лед	$\alpha_H = 1,1756 - 6,083310^{-3}T + 9,503710^{-5}T^2$
$\rho$ (кг/м <sup>3</sup> )	Углевод	$\rho = 1,5991103 - 0,31046 T$
	Зола	$\rho = 2,4238103 - 0,28063 T$
	Клетчатка	$\rho = 1,3115103 - 0,36589 T$
	Жир	$\rho = 9,2559102 - 0,41757 T$
	Белок	$\rho = 1,3299103 - 0,51840 T$
	Вода	$\rho = 997,18 + 3,1439103 T - 3,7574103 T^2$
	Лед	$\rho = 916,89 - 0,13071 T$
$c_p$ (кДж/(кг·°C))	Углевод	$c_p = 1,5488 + 1,962510^{-3}T - 5,939910^{-6}T^2$
	Зола	$c_p = 1,0926 + 1,889610^{-3}T - 3,681710^{-6}T^2$
	Клетчатка	$c_p = 1,8459 + 1,830610^{-3}T - 4,650910^{-6}T^2$
	Жир	$c_p = 1,9842 + 1,473310^{-3}T - 4,800810^{-6}T^2$
	Белок	$c_p = 2,0082 + 1,208910^{-3}T - 1,312910^{-6}T^2$
	Вода	$c_{p1} = 4,0817 - 9,086410^{-3}T + 9,951610^{-4}T^2$ ( $-40 < T < 0$ °C)
		$c_{p2} = 4,1762 - 9,086410^{-5}T + 5,473110^{-6}T^2$ ( $0 < T < 150$ °C)
	Лед	$c_p = 2,0623 + 6,076910^{-3}T$

сплошной среды, в которой случайным образом распределены включения другой фазы. Теплопроводность такого материала по Максвеллу описывается формулой

$$k = k_c \frac{k_d + 2k_c - 2\phi(k_c - k_d)}{k_d + 2k_c + \phi(k_c - k_d)}, \quad (11.14)$$

(все обозначения пояснены выше).

Таблица 11.3. Значения  $A$  и  $\chi_m$  для уравнения Льюиса и Нильсена для различных форм и компоновки диспергированных частиц в некоторой суспензии

Форма диспергированных продуктов	Направление теплотокота	Тип упаковки	$A$	$\chi_m$
Кубическая	Любое		2,0	
Сферическая	Любое		1,5	
		Гексагональная		0,740
		Кубическая гранецентрированная		0,740
		Кубическая объемноцентрированная		0,6
		Простая кубическая		0,524
		Случайная, компактная		0,601
Случайная цилиндрическая				
$L/D = 2$	Любое		1,58	
$L/D = 4$	Любое		2,08	
$L/D = 6$	Любое		2,8	
$L/D = 10$	Любое		4,93	
$L/D = 15$	Любое		8,38	
Ориентированная в одном направлении	Параллельное		$2L/D$	
	Перпендикулярное		0,5	
Цилиндрическая или «волоконная»		Гексагональная компактная		0,907
		Простая кубическая		0,785
		Случайная в одном направлении		0,82
		Случайная в трех направлениях		0,52

В пищевых пористых продуктах материал, образующий ячейки, можно считать сплошной средой, а воздух и/или воду — включениями. Для многофазовой системы с  $N$  дисперсными фазами уравнение 11.14 принимает вид

$$k = k_c \frac{1 - \sum_1^N \frac{\phi_i (S_i - 1)(k_c - k_i)}{k_i + (S_i - 1)k_i}}{1 + \sum_1^N \frac{\phi_i (k_c - k_i)}{k_i + (S_i - 1)k_i}}, \quad (11.15)$$

где  $S_i$  — коэффициент формы частиц, равный  $3/\Psi$  ( $\Psi$  — коэффициент сферичности; для сферы  $\Psi = 1$ ).

В работе [9] описана теоретическая модель двухфазной системы (в предположении, что включения имеют форму цилиндров, образующих квадратную решетку).

Коэффициент теплопроводности представлен функцией объемной доли дисперсной фазы  $\phi$  и отношения теплопроводностей  $p = k_d/k_c$ :

$$k = k_c \frac{(p+1) + (p-1)\phi}{(p+1) - (p-1)\phi}, \quad (11.16)$$

которое для сфер с кубической упаковкой приводит к уравнению Максвелла. Дополнительную информацию можно найти в литературе, приведенной в разделе *Дополнительные источники*.

В работах [62, 63] представлены две статистические модели материала, которые были применены к пищевым продуктам типа овощей и т. п. Первая модель основана на так называемой теории эффективной среды, в которой гетерогенная среда представляется некоторой виртуальной гомогенной средой с такими же свойствами. Эффективный коэффициент теплопроводности  $k$  определяется из уравнения

$$\sum_{i=1}^n \phi_i \frac{k - k_i}{k_i - 2k} = 0, \quad (11.17)$$

где  $\phi_i$  и  $k_i$  — соответственно объемная доля и коэффициент теплопроводности  $i$ -того компонента.

Для двухкомпонентной среды (порошки и другие пористые материалы) решение принимает вид:

$$k = k_p \left( b \pm \sqrt{b^2 - \frac{m}{2}} \right), \quad (11.18)^1$$

где  $k_p$  — коэффициент теплопроводности пор (обычно они заполнены воздухом);  $m = k_{\text{ячейки}}/k_p$ ;  $b$  определяется по формуле

$$b = \frac{1}{4}[(1+\epsilon) + (2-\epsilon)]. \quad (11.19)^1$$

где  $\epsilon$  — общая пористость, то есть объемная доля пор в продукте.

Уравнения (11.11)–(11.19) в работе [62] были применены к картофелю и грушам с различным содержанием влаги. Принято  $k_{\text{ячейки}} = k_{\text{воды}}$ ,  $k_p = k_{\text{возд}}$ , а экспериментальные значения  $\epsilon$  взяты из работы [60]. Получено очень хорошее соответствие с непосредственно измеренными значениями теплопроводности данных продуктов в процессе сушки.

Вторая модель [63] базируется на геометрическом представлении пищевого продукта, известного как мозаика Вороного. Материал разбивается на многоугольники, имитирующие ячейки и поры. Эта теория, примененная к прогнозированию тепло-

<sup>1</sup> Формулы 11.18 и 11.19 в оригинале приведены с ошибками. Здесь они получены как решения уравнения 11.17 при  $n = 2$ . — Прим. науч. ред.

проводности груш и яблок, демонстрирует хорошее согласие с экспериментальными данными, свидетельствуя о том, что использованная геометрическая модель согласуется с физической структурой этих продуктов.

Очевидно, что любая общеизвестная модель может быть применена для определения индивидуальных свойств образца или свойств, присущих определенному продукту. Свойства могут быть рассчитаны по подходящим прогностическим формулам или измерены с использованием тех или иных приборов и методик, на которые необходимо сослаться.

Характеристики свойств композитных материалов могут быть рассчитаны или измерены. Однако результаты измерений не всегда доступны, и тогда модельные расчеты оказываются единственным вариантом, причем собранная информация о свойствах компонентов может быть повторно использована для предсказания свойств других материалов, описывающихся аналогичными моделями.

#### 11.2.1.2 Методы измерения теплопроводности

Существует несколько методов измерения теплопроводности материалов, которые пригодны и для пищевых продуктов. Эти методы можно разделить на две основные группы: методы для установившегося (стационарного) теплового состояния и методы для нестационарного состояния.

##### 11.2.1.2.1 Методы для стационарного состояния

Эти методы основаны на измерении постоянного теплового потока в образце с известной толщиной и площадью потока при постоянном приложенном к границам образца градиенте температуры. При таких условиях температура в любой точке образца не меняется во времени, а зависит только от положения точки. Среди таких методов наиболее известен метод «горячих пластин», названный так из-за изолированных изотермических пластин, ограничивающих данный образец.

В общем случае подобные методы не годятся для пищевых продуктов, так как они требуют очень изощренного и дорогого оборудования, а сами эксперименты — довольно продолжительного времени, что приводит к дополнительным ошибкам вследствие влияния конвекции, миграции воды и изменений в составе материала за время замеров. Кроме того, допускаются лишь умеренные температуры, поскольку чем выше температура, тем больше величина ошибки. С учетом вышесказанного в данной главе мы этим методам больше уделять внимания не будем.

##### 11.2.1.2.2 Методы для нестационарного состояния

В отличие от описанных выше такие методы измерений относительно быстры, дешевы и надежны. Все они основываются на том факте, что любой материал, подвергаемый постоянной нагрузке от источника тепла данной геометрии и в данном положении, термически ведет себя нестационарно, то есть температура в данной точке изменяется со временем в соответствии с физическими характеристиками материала и его теплопроводностью. Анализ температурной истории дает значение теплопроводности с некоторыми ограничениями, которые обсудим ниже. Эти методы применяются также при измерении температуропроводности.



В зависимости от геометрии и режима источника тепла есть методы, основанные на использовании линейных источников тепла типа термощупа или горячей проволоки, и методы, использующие импульсные воздействия. Первые распространены наиболее широко и поэтому их рассмотрим более подробно. Эта теория широко обсуждалась в работах нескольких авторов. Ее современные представления наиболее полно изложены у Мошенина [70], который подробно проанализировал возникающие в получаемых значениях ошибки, вызываемые конечностью размеров образца и миграцией воды. Касада и Уолтон [16] представили усовершенствованную модель температурной кривой для бесконечной среды с учетом конечных значений диаметра и коэффициента теплопроводности щупа. Кент и др. [48] проанализировали методы измерения различных характеристик и дали прекрасный обзор всех существующих моделей.

Эту теорию можно описать следующим образом. Некоторый нематериальный линейный источник тепла, помещенный в некоторую данную среду, создает температурное поле согласно уравнению:

$$T(r, t) = \frac{q}{2\pi k} \int_0^{\infty} \frac{\exp(-\beta^2)}{\beta} d\beta, \quad (11.20)$$

где  $q$  — погонная мощность линейного источника тепла (Вт/м);  $k$  — теплопроводность (Вт/м/°С);  $\beta = r^2/(4\alpha t)$ ;  $t$  — время, прошедшее с момента  $t_0$ ;  $t_0$  — начальный момент времени, при котором начинает действовать источник тепла;  $\alpha$  — температуропроводность (м²/с);  $r$  — расстояние от линейного источника.

Уравнение (11.20) интегрируется, и  $T(r, t)$  получается равным

$$T(r, t) = \frac{q}{2\pi k} \left[ -0, \frac{57721}{2} - \ln \beta + \frac{\beta}{2} - \frac{\beta^2}{4} + \dots \right]. \quad (11.21)$$

В работе [75] показано, что для обеспечения сходимости ряда необходимо учитывать 40 первых членов ряда, однако при значениях  $0 < \beta < 0,16$  ошибка усечения получается приемлемой, если оставить в скобках только первые два слагаемых. Это условие выполняется, если источник тепла и точка, в которой измеряется температура, расположены близко друг к другу, а время нагрева достаточно велико (порядка нескольких минут).

Если испытание проводится таким образом, что в некоторые два момента времени  $t_1$  и  $t_2$  регистрируются две температуры  $T_1$  и  $T_2$ , то уравнение (11.21) принимает вид

$$T_2 - T_1 = \frac{q}{2\pi k} \ln \left( \frac{t_2}{t_1} \right). \quad (11.22)$$

Это — теоретические значения температур в указанные два момента времени  $t_1$  и  $t_2$ . Данное выражение не зависит от радиуса и учитывает ограничения на  $\beta$ , которое означает, что не нужно особенно заботиться о монтаже образца, что, в свою

очередь, дает дополнительные преимущества. На практике термopара или присоединяется к источнику, или располагается внутри источника так, что регистрируемая температура совпадает с температурой самого источника. Очевидно, что если сопоставить значения  $T$  и  $t$ , а  $q$  известно по результатам электрических измерений, с помощью непродолжительного эксперимента можно легко получить  $k$ , причем для эксперимента требуется лишь некоторое устройство, имитирующее линейный источник и не затрагивающее образец.

Тем не менее эксперименты свидетельствуют об отклонениях от значений, прогнозируемых уравнением (11.21), и происходит это под воздействием следующих факторов: конечные размеры как источника, так и самого образца; сопротивление поверхности контакта между ними; различия их теплофизических свойств. В работе [41] было показано, что эти эффекты можно учитывать с помощью некоторого постоянного запаздывания  $t_0$ , так что уравнение 11.22 принимает вид

$$T_2 - T_1 = \frac{q}{2\pi k} \ln \left( \frac{t_2 - t_0}{t_1 - t_0} \right). \quad (11.23)$$

Параметр  $t_0$  имеет ясный физический смысл — это время, требуемое для того, чтобы подъем температуры стал линейной функцией логарифма времени.

В современной практике обычно осуществляют линейную регрессию экспериментальной пары значений  $(T, t)$  [114] путем повторяющихся расчетов все сокращающегося количества пар. По мере того как удаляют более низкие значения времени (так как они лежат выше теоретической линии), каждый расчет дает в данном столбце возрастающие значения. Когда два следующих друг за другом расчета дают одинаковый столбец, это и есть теоретическое значение, поскольку это означает, что получена единственная пара точек, лежащих на данной прямой. Этот метод был успешно применен к измерению теплопроводности яблок с различным содержанием воды и томатной пасты различной концентрации [59, 96] (см. соответственно уравнения 11.65 и 11.39).

### 11.2.1.3 Средства измерения

Как уже отмечалось, наиболее популярными средствами измерения являются горячая проволока и термошуп (термодатчик), так как они просты и надежны и позволяют использовать теорию линейного источника тепла.

И при том, и при другом приеме проволока небольшого диаметра, которую можно нагреть, помещается внутрь образца. Через проволоку пропускается постоянный электрический ток и при помощи присоединенной к ней термopары записывается температура как функция времени. Реакция образца является функцией лишь от выделяемой энергии и теплопроводности, а температура проволоки — единственный подлежащий измерению параметр.

Нагретая проволока размещается вертикально вдоль геометрической оси емкости, в которую помещен анализируемый материал. Данный метод рекомендуется применять при анализе жидкостей, паст и порошков. Верхний и нижний контакты обеспечивают постоянный ток, а прикрепленная к проволоке термopара позволяет регистрировать температуру.

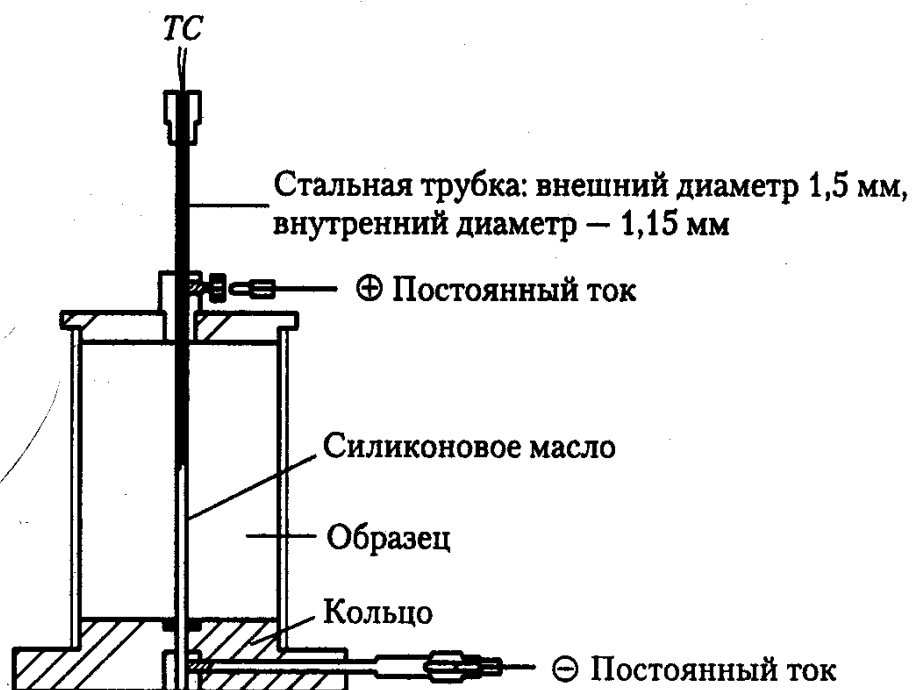


Рис. 11.1. Схема термодатчика [28]

Термодатчик более популярен, чем горячая проволока. Обычно он встраивается в иглу для подкожных инъекций, которая создает сопротивление нагреву, когда термомпара или монтируется с токопроводящими проводами, или прикрепляется к поверхности. Различные приемы рассматривались в работах [18, 108, 124]. Измерения проводятся путем погружения этой иглы в образец, включения тока и регистрации времени и температуры в течение нескольких минут, что зависит от типа материала. В работе [114] описывается модификация этого устройства, где термодатчиком становится нагретая проволока диаметром 0,00005 м (0,5 мм), покрытая в качестве изоляции эпоксидной смолой и резко изогнутая в форме игольного ушка. К этому датчику приклеивается термомпара. Оказалось, что такое устройство намного проще, его удобнее ремонтировать. Как показал эксперимент с чистой субстанцией и с известной теплопроводностью (вода с добавлением 0,5% агарового геля во избежание конвективных токов) его точность составляет  $\pm 2\%$  от табулированных значений. Такой датчик широко применяется для жидкостей и пластичных сред, а также порошков. Основная проблема с его применением для пластичных сред состоит в небольшом воздушном зазоре между датчиком и материалом после его прокалывания. При работе с жидкостями источником ошибок являются конвективные токи. Их можно избежать, смешав жидкость с небольшим количеством гелирующего вещества.

В работе [28] данное устройство было усовершенствовано таким образом, что полученный измерительный прибор стал обладать как признаками горячей проволоки, так и термодатчика (см. рис. 11.1). Датчик служит устройством нагрева, которое, будучи размещенным на конце металлического прута, замыкает электрический контур и работает как горячая проволока. Повышение температуры датчика измеряется при помощи располагаемой внутри трубки термомпары и регистрируется персональным компьютером. Весь эксперимент управляется простой компьютерной программой, которая заодно и проводит расчет значений теплопроводности.

## 11.2.2 Температуропроводность

Температуропроводность ( $\alpha$ ) тесно связана с теплопроводностью, поскольку является параметром переноса в уравнении энергопереноса, утверждающего, что равновесие энтальпий в изотропическом объеме некоторого элемента ограничено поверхностью элемента, через которую проходят тепловые потоки в направлении трех координат (уравнение 11.24):

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T, \quad (11.24)$$

где левая часть представляет собой изменение энтальпии при неустановившемся во времени состоянии, а  $\nabla^2 T$  — градиент потока по трем направлениям, выраженный через температуру из уравнения (11.1).

После группировки физических характеристик получается известное уравнение Лапласа:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T, \quad (11.25)$$

где новая константа  $\alpha$  равна

$$\alpha = \frac{k}{c_p \rho}. \quad (11.26)$$

Лорд Кельвин назвал  $\alpha$  температуропроводностью данного материала, а Максвелл — термометрической проводимостью.

### 11.2.2.1 Измерение температуропроводности

Обычно она вычисляется по уравнению (11.26) попутно с измерением теплопроводности, удельной теплоемкости и плотности. Кроме того, ее можно измерять так же, как и теплопроводность, особенно с использованием термодатчика.

Не так давно в работе [3] был описан импульсный метод, применимый к пищевым продуктам. Некоторый образец, которому придана форма диска или параллелепипеда с параллельными гранями, с одной стороны подвергается воздействию кратковременного энергетического импульса (с помощью лампы-вспышки), способного передать около 800 Дж за одну сотую секунды. Регистрируется увеличение температуры на противоположной стороне образца. График изменения температуры со временем позволяет с помощью несложных формул рассчитать  $\alpha$ . В работе [117] предложена иная техника определения температуропроводности — с использованием линейного источника тепла.

В работе [33] был предложен метод, согласно которому одна сторона бруска тестируемого материала подвергается воздействию известного теплового потока и регистрируется температура противоположной стороны относительно времени. Решение уравнения Фурье приводит к линейной зависимости между логарифмом зарегистрированной температуры и временем, и данные являются функцией темпе-

ратуропроводности. Основным недостатком подобного метода является то, что его надежность уменьшается по мере уменьшения толщины образца, что затрудняет экспериментальное получение данных. Подробнее об этом методе в работах [70, 126].

### 11.2.3 Удельная теплоемкость

Удельная теплоемкость — это количество теплоты, требуемое для увеличения температуры 1 кг материала на 1 °С при заданной температуре. Поскольку удельная теплоемкость меняется с температурой, необходимо уточнение интервала температур. Если увеличение температуры составляет некоторое  $\Delta T$  вследствие воздействия некоторого количества тепла  $Q$  на некоторую массу  $W$ , рассчитанная удельная теплоемкость является некоторой средней, а именно:

$$c_{\text{ср}} = \frac{Q}{W\Delta T}. \quad (11.27)$$

Если  $\Delta T$  мало, а  $q = Q/W$ , уравнение (11.27) дает мгновенное значение  $c$

$$c = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \left( \frac{q}{\Delta T} \right)_T = \left( \frac{dq}{dT} \right)_T. \quad (11.28)$$

Удельная теплоемкость газа зависит от условий теплопередачи (при постоянном объеме или постоянном давлении), для которых определяются два параметра —  $c$  и  $c_p$ . Удельная теплоемкость твердых тел и жидкостей зависит от температуры, но не чувствительна к давлению, поскольку они практически несжимаемы. Тем не менее обычно используют удельную теплоемкость  $c_p$  (при постоянном давлении). Пищевые продукты не исключение, поскольку все процессы их переработки выполняются при данном условии. Параметрами, требуемыми для расчета, являются температура, содержание влаги и пористость (для пористого материала).

В соответствии с определением единицами удельной теплоемкости являются кДж/(кг · °С), но применяются также ккал/(кг · °С). При этом следует помнить, что согласно определению калории и Британской термической единицы (BTU) в метрической и английской системе мер численное значение  $c_p$  в этих системах одно и то же.

#### 11.2.3.1 Измерение удельной теплоемкости

Удельную теплоемкость традиционно измеряли в калориметрах, состоявших из изолированной колбы Девара, где  $W_{\text{эт}}$  граммов эталонной жидкости с известной удельной теплоемкостью  $c_{p,\text{эт}}$  и температурой  $T_{i,\text{эт}}$  вступает в контакт с  $W_s$  граммами испытываемого образца при другой температуре  $T_{i,s}$ , позволяющей им достичь финальной равновесной температуры  $T_{\text{eq}}$ . Если потери пренебрежимо малы, уравнение простого баланса энтальпий позволяет рассчитать  $C_p$  образца с помощью уравнения:

$$c_p = \frac{c_{p,\text{эт}} W_{\text{эт}} (T_{i,\text{эт}} - T_{\text{eq}})}{W_s (T_{\text{eq}} - T_{i,s})}. \quad (11.29)$$

Эталонное вещество — это обычно вода или растительное масло в зависимости от природы испытуемого материала.

В настоящее время измерение удельной теплоемкости осуществляется с помощью дифференциального сканирующего калориметра (ДСК). Он прост в использовании и намного точнее, но требует несколько более сложного оборудования. Основное назначение этого прибора — измерять количество тепла, требуемого для повышения температуры образца на заданную величину в рамках некоторого заданного интервала.

Измерения включают предварительное определение некоторой базовой линии еще без образцов, только с алюминиевыми тарелками для них и контрольным веществом. Полученный график — это «калориметрический эквивалент», то есть энергия, требуемая для нагрева вспомогательных элементов, из которого впоследствии вычитают снимаемые показания.

Измерение осуществляется путем сравнения с некоторым внешним эталоном, удельная теплоемкость которого известна. Это облегчает процедуру и делает ее более надежной. Расчет теплоемкости производят по уравнению

$$c_p = \frac{W_{\text{эт}}}{W} \frac{d}{d_{\text{эт}}} c_{p,\text{эт}}, \quad (11.30)$$

где  $c_{p,\text{эт}}$ ,  $W_{\text{эт}}$  и  $d_{\text{эт}}$  — удельная теплоемкость, масса и отклонение эталона от базовой линии соответственно; а  $c$ ,  $W$ ,  $d$  — соответствующие значения испытуемого материала.

Все варианты ДСК имеются в продаже и производятся известными в данной области фирмами, которые предоставляют покупателям всю необходимую для проведения испытаний информацию.

## 11.2.4 Плотность и удельный вес

Плотность — это отношение массы к единице объема, измеряют ее в  $\text{кг}_m/\text{м}^3$  (в килограммах массы). Удельный вес — это относительная плотность, то есть отношение между фактической плотностью и плотностью некоторого эталонного вещества, принятой за единицу (например, воды для жидкостей и твердых тел). Таким образом, удельный вес — безразмерная величина. Удельный вес также — это вес единицы объема, измеренный в  $\text{кгс}/\text{м}^3$  (в килограммах силы).

### 11.2.4.1 Измерение плотности

Существуют два основных метода измерения плотности жидкостей: гидрометрический и пикнометрический.

Гидрометрический метод основан на законе Архимеда и сводится к измерению потери веса некоторого твердого тела известного объема, погруженного в данную жидкость. При этом требуется, чтобы плотность твердого тела превышала плотность жидкости. Можно легко показать, что  $\rho$  (плотность жидкости) равно

$$\rho = \frac{P_0 - P_s}{m_b} \rho_b \frac{g}{g_c}, \quad (11.31)$$

где  $P_0$  и  $P_s$  (кг) — веса данного тела в воздухе и в жидкости соответственно, а  $m_b$  и  $\rho_b$  — масса и плотность данного тела; коэффициент  $\frac{g}{g_c}$  учитывает разницу размерностей  $P$  и  $m$ , делая это уравнение гомогенным относительно размерностей без изменения численного результата, так как во всех практических задачах оно приравняется 1.

И действительно, масса и вес в численном виде равны, то есть 1 кгс — это вес 1 кг<sub>м</sub>. При этом численное значение плотности в кг<sub>м</sub>/м<sup>3</sup> является тем же, что и в кгс/м<sup>3</sup>.

Пикнометр — это по существу калиброванная колба, позволяющая взвешивать точные известные объемы жидкости, что в свою очередь дает плотность  $\rho = W/V$ . Для установления экспериментальной температуры пикнометр погружают в ванну с постоянной температурой и наполняют испытуемым материалом (образцом). Вес определяется путем вычитания веса пустой колбы. Более подробная информация относительно данного метода приведена в ASTM-стандартах D368, D891, D1298 для гидрометров и D369 и D891 — для пикнометров с описанием всех деталей проведения экспериментов.

Для мясных продуктов рекомендуется добавить некоторую известную массу (примерно 5 г) образца в калиброванную колбу объемом 60 мл, дополнив объем дистиллированной водой при 22 °С, и рассчитать плотность с помощью уравнения:

$$\rho = \frac{w}{V_s} = \frac{w}{60 - V_w}, \quad (11.32)$$

где  $w$  и  $V_s$  — масса и объем данного образца, рассчитанные из добавленного объема воды  $V_w$ .

## 11.2.5 Уравнения для прогностических целей

По теплофизическим свойствам пищевых продуктов существует несколько обзорных работ с конкретными данными по отдельным продуктам при заданных условиях, а также прогностические формулы для отдельных совокупностей пищевых ингредиентов (обычно в виде функций от температуры и, по необходимости, от содержания влаги и пористости). Однако необходимо заметить, что несмотря на интенсивный труд многих коллективов ученых по выводу уравнений, обладающих прогностической силой, существуют и аппроксимации различной степени точности, с которыми нужно обращаться с осторожностью. Пищевые продукты — это «живой» материал, где в одном и том же образце могут наблюдаться определенные отличия. Вся информация должна обрабатываться как «первое приближение», а при необходимости получения более точных данных следует добиваться наличия экспериментальных данных по тем или иным пищевым системам — как правило, с помощью некоторых вышеописанных методов. По этому поводу советуем читателю ознакомиться с разделом «Дополнительная литература», где приводятся источники получения информации по этому вопросу.

При рассмотрении плотности основных пищевых ингредиентов обычно считается, что плотности жиров, белков и углеводов находятся в узком диапазоне, и поэтому для большинства расчетов их принимают соответственно 0,92; 1,25 и 1,55 г/см<sup>3</sup>.

Исходя из опубликованных материалов, в данном разделе мы приводим величины, характеризующиеся одним или несколькими нижеперечисленными свойствами (без учета их приоритета):

- надежность (по мнению авторов);
- удобство применения;
- широкий диапазон применения;
- соответствие реальной физической модели.

Информация дается по отдельному продукту или по группе сходных продуктов.

#### 11.2.5.1 Жидкости, растворы и взвеси (суспензии)

Как уже отмечалось, в работе [19] был предложен довольно интересный подход, выражающийся в представлении корреляции характеристик основных компонентов пищевых продуктов как функций от температуры. Такой подход позволяет с помощью дополнительных моделей, выражаемых уравнениями (11.6)–(11.10), рассчитать данную характеристику составного продукта. Эти корреляции представлены в табл. 11.2. Используется диапазон температур от 40 до 150 °С для взвесей с содержанием твердых веществ от 0 до 95%, а прогнозируемые значения, как сообщается, имеют погрешность в 3,9% от значений, указанных в литературе для жидких пищевых продуктов и 4,7% — для молока, концентрированного выпариванием, апельсинового сока и различных соусов.

##### 11.2.5.1.1 Соки

Среди жидкостей соки являются хорошим примером полезности подобных корреляций. Исходя из предположения, что соки — это растворы сахаров, была предложена следующая формула для определения теплопроводности:

$$k = (565,22 + 1,8T - 0,006T^2)(0,46 + 0,0054M) \times 10^{-3}. \quad (11.33)$$

В работе [21] для различных характеристик осветленного яблочного сока было получено:

$$\rho = 0,82780 + 0,34708 \exp(0,01Bx) - 5,479 \times 10^{-4}T, \quad (11.34)$$

где  $Bx$  — концентрация в градусах Брикса (°Brix);  $T$  — температура в К.

С учетом теоретической величины  $\rho$  относительно плотности воды  $\rho_w$  влияние температуры выражается формулой

$$\rho = \frac{\rho_w}{0,992417 - 3,739 \times 10^{-3}Bx}. \quad (11.35)$$

Аналогичный анализ относительно теплопроводности приводит к уравнениям:

$$k = 0,27928 - 35722 \times 10^{-3}Bx + 1,1357 \times 10^{-3}T, \quad (11.36)$$

$$k = \frac{k_{w0}\rho}{\rho_w(0,9789 - 0,007719Bx)}. \quad (11.37)$$



Для удельной теплоемкости осветленного яблочного сока в той же работе было получено:

$$c_p = 0,80380 - 4,3416 \times 10^{-3} Bx + 5,6063 \times 10^{-4} T. \quad (11.38)$$

Теплопроводность томатной пасты равна [96]:

$$k = 0,647 - 0,276 \exp(-0,5927 Bx). \quad (11.39)$$

Удельная теплоемкость фруктовых соков с содержанием воды более 50% равна:

$$c_p = 1674,7 + 25,12M. \quad (11.40)$$

В работе [2] представлена общая формула для плотности фруктовых соков, которая, как считают авторы, хорошо согласуется со значениями, полученными по модели из [19] и экспериментальными значениями для 30 разных соков. Эта формула действует для температур выше точки замерзания и концентрации твердых веществ до 30 °Bx.

$$\rho = (1002 + 4,61Bx) - 0,460T + 7,001 \times 10^{-3} T^2 - 9,175 \times 10^{-6} T^3. \quad (11.41)$$

В работе [7] приведена формула для корреляции плотности и вязкости натуральных подкисленных вишневого, яблочного и грейпфрутового соков как функция от температуры и концентрации. Для натурального вишневого сока

$$\rho = 0,79 + 0,34 \exp(0,0108 Bx) - 5,41 \times 10^{-4} T(K), \quad (11.42)$$

$$\ln \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right) = \frac{\left( -0,3 + \frac{920}{T} \right) Bx}{100 - (1,83 - 3,55 \times 10^{-3} T) Bx}, \quad (11.43)$$

где  $\mu_{w0}$  — вязкость воды при той же температуре, температура — в К, концентрация сухих растворимых веществ — в °Брикса (Bx).

В работе [6], основанной на предшествующей работе [21], для яблочного сока предлагается

$$\rho = 0,83 + 0,35 \exp(0,01 Bx) - 5,64 \times 10^{-4} T \quad (11.44)$$

и

$$\ln \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right) = \frac{\left( -0,24 + \frac{918}{T} \right) Bx}{100 - (2,03 - 2,67 \times 10^{-3} T) Bx}. \quad (11.45)$$

Таблица 11.4. Коэффициенты уравнения (11.48) прогнозирования теплопроводности молочных продуктов

Тип молока	$a_0$	$a_1 \times 10^2$	$a_2 \times 10^2$	$a_3 \times 10^4$	$a_4 \times 10^4$	$a_5 \times 10^6$	Стандартная погрешность
Обезжиренное (снятое)	13,00	-4,01	5,21	-1,2	-1,78	0,3	0,06
С 50%-ной жирностью	12,61	-4,92	7,24	-15,6	-3,23	11,2	0,10
Цельное	13,21	-7,63	7,70	-13,5	-5,07	12,1	0,14

По [30].

Были получены также аналогичные характеристики грейпфрутового сока:

$$\rho = 0,74 + 0,43 \exp(0,01 Bx) - 5,55 \times 10^{-4} T; \quad (11.46)$$

$$\ln \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right) = \frac{\left( -0,24 + \frac{1821}{T} \right) Bx}{100 - (0,86 - 4,41 \times 10^{-3} T) Bx}. \quad (11.47)$$

В работе [31] предложена модель прогнозирования теплопроводности молока для температур от 5 до 75 °С и с содержанием сухих веществ  $S$  до 40%:

$$k = a_0 + a_1 S + (a_2 + a_3 S) T + (a_4 + a_5 S) T^2, \quad (11.48)$$

коэффициенты  $a_i$  для которой приведены в табл. 11.4.

В работе [31] приводятся такие же данные для сливок (температура приведена в °С):

$$k = 912,63 + 0,51T - 0,000175T^2 \left[ 1 - (0,0843 + 0,0019T) \phi_f \right] 4,18 \cdot 10^{-3}, \quad (11.49)$$

где  $\phi_f$  — объемная доля жира.

В работе [110] дана корреляция теплопроводностей молочных продуктов и маргарина и массовой доли воды  $w_w$  в виде линейной зависимости:

$$k = 0,141 + 0,412 w_w. \quad (11.50)$$

### 11.2.5.2 Мясные продукты

В работах [98, 99] приведены уравнения для расчета тепло- и температуропроводности, энтальпии, кажущейся удельной теплоемкости и плотности мясных продуктов, а также криоскопические температуры и данные по массовой доле связанной воды в замороженных продуктах. Для более точной оценки значений этих параметров при

различных температурах и для получения корреляционных зависимостей рекомендуется обратиться к этим работам, поскольку представленные там данные по теплофизическим свойствам мясных продуктов являются достаточно надежными.

В работе [8] предложены корреляционные зависимости для теплофизических свойств замороженной баранины и ягнятины. Плотность  $\rho$  представлена как функция плотностей незамороженного мяса  $\rho_0$ , воды  $\rho_w$ , льда  $\rho_h$  и доли невымороженной воды  $\Psi$ , а также доли замороженной воды  $w_h$ ;  $Y_w$  — содержание влаги, М/100 г:

$$\rho_f = \frac{\rho_0}{1 + \frac{Y_w w_h \rho_0}{\rho_a} \left( \frac{\rho_0}{\rho_h} - 1 \right)}, \quad (11.51)$$

а  $w_h$  задается как функция от температуры:

$$w_h = 0,9418 + \frac{0,8597}{T}. \quad (11.52)$$

Теплопроводность для трех различных диапазонов температур равна:

$$\begin{aligned} k &= 0,48534 + 1,0627 \cdot 10^{-3} T \quad \text{для } T \geq -0,9113^\circ \text{C}, \\ k &= 0,48436 + 3,7590 \cdot 10^{-4} w_i \quad \text{для } -1,15^\circ \text{C} \leq T \leq -0,913^\circ \text{C}; \\ k &= 1,3598 + \frac{0,97069}{T} \quad \text{для } T \leq -1,15^\circ \text{C}. \end{aligned} \quad (11.53)$$

Для удельной теплоемкости, рассчитанной при начальной температуре замораживания выше криоскопического ( $T_0$ ), они рекомендуют уравнение Леви [55]:

$$c_{p0} = 0,979 + 3,1754Y. \quad (11.54)$$

Для температур выше  $T_0$

$$\begin{aligned} c_{p0} &= \frac{c_2}{(c_1 - T)^2} \quad \text{для } T \geq T_g; \\ c_{p0} &= \frac{c_3 T}{(c_1 - T)^2} \quad \text{для } T < T_g \end{aligned} \quad (11.55)$$

где  $T_g$  — температура, при которой изменяется градиент энтальпии.

Путем регрессии экспериментальных точек можно рассчитать  $c_i$  и  $T_g$  для трех различных значений содержания воды. При экстраполяции их к обычным значениям  $Y_w$  баранины (ягнятины) полученные значения используются в качестве констант для данного продукта, так как разница оказывается меньше экспериментальной погрешности. Все эти значения приведены в табл. 11.5.

Таблица 11.5. Коэффициенты уравнения 11.55 для расчета  $c_p$  замороженного мяса

Вода, %	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$T_g$
4,4	1,69	280,35	42,65	-6,7
52,5	1,37	349,22	46,90	-7,0
64,9	0,87	377,52	48,57	-7,0
74-76	0,46	385,00	48,20	-8,0

По [8].

В работе [109] предложены корреляционные зависимости для теплопроводности продуктов животного происхождения (говядины, птицы и рыбы), которые считаются лучшими среди шести других корреляций (стандартное отклонение менее 10%). Самая простая связывает теплопроводность с содержанием воды:

$$k = 0,080 + 0,0052 M \quad (11.56)$$

для температур выше точки замерзания и вплоть до 60 °С и  $M = 60-80\%$ , и

$$k = -0,28 + 0,019 T \quad (11.57)$$

для температур от -40 °С до -5 °С и  $M = 65-85\%$ .

### 11.2.5.3 Пористые пищевые продукты

Пористые пищевые продукты представляют собой типичный пример композитных материалов, которые уже рассматривались при обсуждении модели двухфазных сред (см., например, уравнения 11.4, 11.11, 11.12 и 11.14-11.17) — это фрукты, овощи, зерновые продукты, мука и различные порошки.

Для вычисления теплопроводности фруктов и овощей в работе [108] рекомендуется использовать уравнение

$$k = 0,148 + 0,493 M, \quad (11.57)$$

которое верно до значений  $M$ , равных 60%, но которое не следует применять к слишком пористым фруктам и к фруктам с пониженной плотностью.

В работе [85] даны корреляционные зависимости  $k$ ,  $c_p$  и  $\alpha$  по объединенным экспериментальным данным относительно сортов яблок «Голден Делишиус» и «Грэнни Смит» выше и ниже точки замерзания. Экспериментальные значения  $k$  и  $c_p$  определялись соответственно методом нагревания образца и с помощью ДСК. Температуропроводность рассчитывалась по  $k$ ,  $c_p$  и  $\rho$ . В нижеприведенных уравнениях  $M$  и  $T_f$  — это, соответственно, общее содержание воды в процентах и температура замерзания в °С.

Теплопроводность

$$k = 0,0159M + 0,0025T - 0,994 \quad \text{для } T > T_f, \quad (11.59)$$

$$k = 0,133M + 0,0103T - 10,3 \quad \text{для } T \leq T_f.$$

Удельная теплоемкость сорта «Грэнни Смит» как функция температуры равна

$$\begin{aligned} c_p &= 3,40 + 0,049T & \text{для} & \quad -1 < T < 60 \text{ }^\circ\text{C}, \\ c_p &= 2,65 - 1,42T & \text{для} & \quad -10 < T < -1 \text{ }^\circ\text{C}, \\ c_p &= 2,49 - 0,760T & \text{для} & \quad -25 < T < -10 \text{ }^\circ\text{C}, \\ c_p &= 2,50 - 0,0118T & \text{для} & \quad T \leq -25 \text{ }^\circ\text{C}. \end{aligned} \quad (11.60)$$

Удельная теплоемкость сорта «Голден Делишиус» как функция температуры равна

$$\begin{aligned} c_p &= 3,36 + 0,075T & \text{для} & \quad -1 < T < 60 \text{ }^\circ\text{C}, \\ c_p &= 2,18 - 1,48T & \text{для} & \quad -10 < T < -1 \text{ }^\circ\text{C}, \\ c_p &= 2,44 - 0,791T & \text{для} & \quad -25 < T < -10 \text{ }^\circ\text{C}, \\ c_p &= 2,89 - 0,0138T & \text{для} & \quad T \leq -25 \text{ }^\circ\text{C}. \end{aligned} \quad (11.61)$$

Температуропроводность при температурах до  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  для сорта «Голден Делишиус» равна:

$$\begin{aligned} \alpha &= (-0,187 - 1,22) \cdot 10^{-7} & \text{для} & \quad -25 < T \leq -10 \text{ }^\circ\text{C}, \\ \alpha &= (0,437 - 4,37) \cdot 10^{-7} & \text{для} & \quad -10 < T \leq T_f, \\ \alpha &= (-0,00278T - 1,39) \cdot 10^{-7} & \text{для} & \quad T > T_f; \end{aligned} \quad (11.62)$$

для сорта «Грэнни Смит»:

$$\begin{aligned} \alpha &= (-0,123 - 0,603) \cdot 10^{-7} & \text{для} & \quad -25 < T \leq -10 \text{ }^\circ\text{C}, \\ \alpha &= (0,399 - 3,66) \cdot 10^{-7} & \text{для} & \quad -10 < T \leq T_f, \\ \alpha &= (-0,00556T - 1,31) \cdot 10^{-7} & \text{для} & \quad T > T_f. \end{aligned} \quad (11.63)$$

В работе [54] приведены данные по коррелированным плотности и теплопроводности яблок как функция содержания воды по всему диапазону давлений от поверхности до семечек:

$$\rho = 0,636 + 0,102 \ln(X) \quad (r^2 = 0,978), \quad (11.64)$$

$$k = 0,489 - 0,433 \exp(-0,206X) \quad (r^2 = 0,967), \quad (11.65)$$

где  $X$  — масса воды, г/г сухого вещества.

В работе [62] сравнивались экспериментальные данные по теплопроводности картофеля и груш как функции от содержания воды ( $X$ ):

– картофель:

$$k = 0,5963 - \frac{0,1931}{X} + \frac{0,0301}{X^2}; \quad (11.66)$$

– груши:

$$k = 0,4875 - \frac{0,0566}{X} + 0,0227 \ln(X), \quad (11.67)$$

что действительно для  $X/X_0$  от 0,1 до 1 при  $r^2 = 0,95$ .  $X_0$  соответствует содержанию воды в свежем продукте.

В работе [63] были предложены уравнения (11.68) и (11.69) (соответственно для яблок и груш):

$$k = 0,605 - 0,529 \exp(-0,121X) \quad (r^2 = 0,99), \quad (11.68)$$

$$k = 0,493 - 0,359 \exp(-1,033X) \quad (r^2 = 0,96). \quad (11.69)$$

Корреляционные зависимости для теплопроводности насыпного ячменя, чечевицы и бобов приведены в работе [1], причем относительная средняя ошибка составляет для исследованных диапазонов температур ( $-29 < T < 29$  °С и  $9 < M < 23\%$ ) около 2% для всех трех продуктов:

– ячмень:

$$k = 0,173 + 7,51 \cdot 10^{-4} T + 1,51 \cdot 10^{-3} M; \quad (11.70)$$

– чечевица:

$$k = 0,193 + 10^{-3} T + 1,51 \cdot 10^{-3} M; \quad (11.71)$$

– бобы:

$$k = 0,168 + 8,4 \cdot 10^{-4} T + 3,05 \cdot 10^{-3} M. \quad (11.72)$$

Что касается картофеля, в работе [125] удельная теплоемкость представлена как функция от содержания воды в двух диапазонах:

$$c_p = (0,216 + 0,78Y_w)4,1868 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)} \quad \text{для } Y_w > 0,5; \quad (11.73)$$

$$c_p = (0,393 + 0,437Y_w)4,1868 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)} \quad \text{для } Y_w < 0,5. \quad (11.74)$$

Уравнения для линейной подстановки с температурой в °С и с погрешностью от 2 до 5% были получены из табличных данных [94]:

$$\alpha \cdot 10^7 = 1,263 + 8,286 \cdot 10^{-4}, \quad (11.75)$$

$$k = 0,296 + 3,057 \cdot 10^{-3} T, \quad (11.76)$$

$$\rho = 1,300 + 2,517 \cdot 10^{-3} T, \quad (11.77)$$

$$c_p = 1,793 + 2,544 \cdot 10^{-3} T. \quad (11.78)$$

В работе [121] удельную теплоемкость картофеля измеряли с помощью метода ДСК в температурном диапазоне от 40 до 70 °С и с содержанием влаги от 0 до 80%. Были получены экспериментальные данные, которые коррелируются с уравнением (11.79)

$$c_p = 0,406 + 0,00146T + 0,203M - 0,0249M^2 \quad (11.79)$$

со средним относительным отклонением в 3,36%. Авторы считают это весьма хорошим согласованием с экспериментальными результатами.

Относительно желатинизированного крахмала в работе [61] предлагается следующее уравнение:

$$k = 0,210 + 0,410 \cdot 10^{-3} T \quad \text{для } 303 \text{ К} < T < 343 \text{ К}. \quad (11.80)$$

В работе [15] измерялась теплопроводность картофеля (по 23 точкам) в температурном диапазоне от 50 до 100 °С. Получено квадратное уравнение, которое удовлетворяло экспериментальным значениям со средним абсолютным отклонением в 2,3% при  $r^2 = 0,985$

$$k = 1,05 - 1,96 \cdot 10^{-2} T + 1,90 \cdot 10^{-4} T^2. \quad (11.81)$$

Для фисташек с содержанием воды от 5 до 40%:

– общая плотность согласно [42] составляет

$$\rho = 439 + 5,003M \quad (r^2 = 0,959); \quad (11.82)$$

– удельный вес

$$\gamma = 1,289 - 3,375 \cdot 10^{-3} M \quad (r^2 = 0,975) \text{ (убывает с ростом } M); \quad (11.83)$$

Таблица 11.6. Коэффициенты уравнения (11.88) для расчета плотности овощей

Пищевой продукт	Плотность	$h$	$m$	$p$	$q$	$r^2$
Морковь	Насыпью	0,984	0	0,224	1,80	0,97
	Штучно	1,497	-0,294	-0,253	39,793	0,96
	Штучно (очищ.)	1,497	-0,294	0,033	36,820	0,97
Груша	Насыпью	1,251	-0,153	-0,107	$1,33 \cdot 10^{-6}$	0,97
	Частично	0,832	0,220	0,632	2,775	0,97
Картофель	Насыпью	1,202	-0,148	0,259	15,507	0,96
	Частично	1,234	-0,117	0,085	19,040	0,97
Сладкий картофель	Насыпью	1,266	-0,219	-0,319	6,700	0,96
	Штучно (целиком)	3,260	1,172	-2,325	-0,395	0,96
Чеснок	Насыпью (дольками)	1,130	-0,567	0,187	-0,866	0,95
	Штучно	2,694	0	-1,316	-0,1638	0,95

По [60].

– удельная теплоемкость

$$c_p = 1074 + 27,79M \quad (r^2 = 0,920); \quad (11.84)$$

– теплопроводность

$$k = 0,0866 - 0,2817 \cdot 10^{-3} M \quad (r^2 = 0,963); \quad (11.85)$$

– общая насыпная теплопроводность

$$0,0260 + 0,4113 \cdot 10^{-3} M \quad (r^2 = 0,992); \quad (11.86)$$

– температуропроводность

$$\alpha = 51,1 \cdot 10^{-9} - 0,568 \cdot 10^{-9} M \quad (r^2 = 0,983) \text{ (убывает с ростом } M). \quad (11.87)$$

В работе [60] измеряли насыпную плотность и плотность частиц различных овощей и вывели формулу

$$\rho = h + m \frac{X}{X_0} + p \exp\left(-q \frac{X}{X_0}\right), \quad (11.88)$$

где коэффициенты  $h$ ,  $m$ ,  $p$  и  $q$  берутся из табл. 11.6.

Показано, что уравнение (11.88) не годится для расчета плотности частиц сладкого картофеля, для которого составлена формула:

$$\rho_{\text{сл. карт.}} = 1,553 - 4,954 \frac{X}{X_0} + 4,630 \exp\left(-q \frac{X}{X_0}\right)^{1,051}. \quad (11.89)$$



#### 11.2.5.4 Крупы, мука, макаронные и мучные изделия

Что касается удельной теплоемкости хлеба, в работе [20] высказано предположение, что ее зависимость от содержания влаги подчиняется модели:

$$c_p = c_p(\text{вода})M + c_p(CB)(1 - M), \quad (11.90)$$

где теплоемкость сухих веществ  $c_{p,CB}$  задается как

$$c_{p,CB} = 0,098 + 0,0049T \quad \text{при } 298 \text{ K} < T < 358 \text{ K}. \quad (11.91)$$

Теплопроводность хлеба равна

$$\ln k = -4,12 - 17,8M + 0,0031T + 0,065M. \quad (11.92)$$

Для макаронных изделий в работе [5] было получено:

$$k = 0,23 Y_w + 0,308 \quad \text{при } 20^\circ \text{C} \quad (11.93)$$

и

$$k = 0,30 Y_w + 0,302 \quad \text{при } 6^\circ \text{C}, \quad (11.94)$$

но так как зависимость от температуры выражена не очень сильно, оба этих уравнения могут быть арифметически усреднены, и получается единственное выражение для всего диапазона температур от 20 до 60 °C:

$$k = 0,285 Y_w + 0,305 \quad (11.95)$$

с погрешностью в районе граничных температур порядка 1%.

Применив последовательную модель со значениями  $k$  для крахмала, желатина, сахарозы и клейковины соответственно 0,39, 0,34, 0,30 и 0,29 Вт · м<sup>-1</sup> · К<sup>-1</sup>, было получено наилучшее ее соответствие экспериментальной модели геля с этими ингредиентами. Это означает, что указанные значения полезны для определения эффективной теплопроводности пищевых продуктов, аналогичных макаронным изделиям из твердых сортов муки.

Для температуропроводности макаронных изделий  $\alpha$  в работе [5] предлагается формула на основе функции от содержания воды  $M$ :

$$\alpha = 1,91 - 2,76 M + 3,19 M^2 \quad \text{при } 20^\circ \text{C}, \quad (11.96)$$

$$\alpha = 1,71 - 1,81 M + 1,93 M^2 \quad \text{при } 40^\circ \text{C}, \quad (11.97)$$

$$\alpha = 1,47 - 0,74 M + 0,62 M^2 \quad \text{при } 60^\circ \text{C}. \quad (11.98)$$

Общая формула с  $Y_w$  и  $T$  со средней погрешностью в 4%:

$$\alpha = (1,73 - 0,9 M - 0,003 T)10^{-7} \quad \text{при } 40^\circ \text{C}. \quad (11.99)$$

Плотность макаронных изделий измерялась методом пикнометрии с этанолом в качестве растворителя и как функция от содержания влаги была скоррелирована уравнением (11.97) до

$$1/\rho = (3,02 M + 6,46) 10^{-4}. \quad (11.100)$$

Удельная теплоемкость крахмала:

$$c_p = 5,737T + 1328, \quad (11.101)$$

а клейковины

$$c_p = 6,329T + 1465. \quad (11.102)$$

Применив аддитивную модель (уравнение 11.8), можно рассчитать удельную теплоемкость макаронных изделий.

Из таблицы, приведенной в [120], выводятся формулы для температуропроводности двух пищевых продуктов:

– для желтозерной зубовидной кукурузы:

$$\alpha = 1,05 \cdot 10^{-3} - 1,739 \cdot 10^{-5} M + 4,36 \cdot 10^{-7} M^2 \text{ для } 8,7 < T < 23,3 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (11.103)$$

– для муки высшего сорта

$$\alpha = 9,56 \cdot 10^{-4} - 1,83 \cdot 10^{-6} M + 4,36 \cdot 10^{-7} M^2 \text{ для } 8,7 < T < 23,3 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (11.104)$$

с погрешностью менее 1 и 4% соответственно.

В работе [120] рекомендуется (при отсутствии других данных и только для оценки удельной теплоемкости пищевых продуктов) использовать уравнения, приведенные в [100]:

$$c_p = 0,200 + 0,008M \text{ (для значений выше точки замерзания)}, \quad (11.105)$$

$$c_p = 0,200 + 0,003M \text{ (для значений ниже точки замерзания)}. \quad (11.106)$$

В работе [67] сообщается, что плотность пористых пищевых продуктов (где пористость обозначена как  $\epsilon$ , а  $w_i$  и  $\rho_i$  — массовая доля и плотность ингредиента  $i$ ) определяется формулой Кийя (*Keey*) для пористых материалов

$$\rho = (1 - \epsilon) \frac{1}{\sum \frac{x_i}{\rho_i}}. \quad (11.107)$$

#### 11.2.5.5 Замороженные пищевые продукты

При работе с замороженными пищевыми продуктами очень важным параметром является температура начала замерзания, так как ее значение разделяет две области

Таблица 11.7. Коэффициенты уравнений (11.108) и (11.110) для расчета доли вымороженной воды

Пищевой продукт	$a$	$b$	$c \cdot 10^3$	$d \cdot 10^3$
Говядина	-2,51	1,262	2,2	0,09
Морская рыба	-3,62	1,160	-6,2	-0,03
Яичный белок	-2,94	1,164	-5,5	-0,03
Сыр (не жирный)	-3,37	1,071	-5,1	-0,01
Дрожжи хлебопекарные	-3,13	1,226	3,7	0,11
Хлеб из пшеничной муки	-2,67	0,992	-12,7	-0,14
Крахмал картофельный	-0,31	1,365	-1,5	0,00
Экстракт кофе	-5,76	1,123	5,8	0,15

По [67].

с различным тепловым поведением и ниже которого вода полностью или частично присутствует в форме льда.

В работе [67] приводится уравнение из [95] для расчета температуры начала вымораживания ( $T_f$ , °C)

$$(dT_f^3 + cT_f^2 + a) \cdot (x_w - 1) + T_f [b(x_w - 1) + 1] = 0, \quad (11.108)$$

где  $x_w$  — мольная доля воды; константы  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$  для разных пищевых продуктов берутся из табл. 11.7. Эти же константы можно использовать для расчета количества льда, образующегося из воды, содержащейся в данном пищевом продукте. Оно определяется формулой

$$Y_{\text{льда}} = \frac{s + Y_w - 1}{s}, \quad (11.109)$$

где

$$s = \frac{T}{a + bT + cT^2 + dT^3}. \quad (11.110)$$

Изменения энтальпии, вызванные нагреванием или охлаждением конкретного продукта, могут быть вычислены путем интегрирования  $c_p dT$  данного продукта, принимая  $c_p$  постоянной в некотором температурном интервале, имея в виду, что внутри данного интервала не происходит фазовых изменений:

$$\Delta H = \int_{T_1}^{T_2} c_p dT. \quad (11.111)$$

Таблица 11.8. Коэффициенты уравнения (11.112) для расчета удельной теплоемкости жиров

Константа	Говяжий жир	Свиной жир
$n$	2	2
$A$ (Дж/(кг · °C))	1884	1420
$B$ (Дж/(кг · °C))	7,008	3,67
$A_1$ (Дж/(кг · °C))	0,00224	0,00373
$B_1$ (Дж/(кг · °C))	20	50
$T_1$ (°C)	13,8	1,18
$A_2$ (Дж/(кг · °C))	0,00428	0,0045
$B_2$ (Дж/(кг · °C))	100	150
$T_2$ (°C)	47,85	26,85

## 11.2.5.6 Животные и растительные жиры и масла

В работе [52] приводится следующая формула для определения удельной теплоемкости жиров:

$$c_{p,f} = A + BT + \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{1 + \frac{B_i}{A_i}(T - T_i)^2}, \quad (11.112)$$

где значения констант берутся из табл. 11.8.

В работе [76] приводятся корреляционные параметры для  $c$  и  $m$  для уравнений типа

$$\rho = c + mT (°C) \quad (11.113)$$

для семи видов растительных масел (крамбе, рапсового, кукурузного, соевого, молочайного, кокосового, лекерелла) и восьми жирных кислот (пеларгоновой, каприловой, лауриновой, миристиновой, пальмитиновой, стеариновой, олеиновой и эруковой).

В работе [77] даны формулы вязкости этих же пищевых продуктов

$$\ln \mu = A + \frac{B}{T} + \frac{C}{T^2} \quad (11.114)$$

и

$$\ln \mu = A + \frac{B}{T} + CT, \quad (11.115)$$

где  $\mu$  дается в сантипуазах,  $T$  — в К; константы  $A$ ,  $B$ , и  $C$  берутся из таблицы, приведенной в вышеуказанной работе.

### 11.2.5.7 Прочие продукты

Экспериментальные значения теплопроводности четырех пищевых продуктов были скоррелированы одной формулой [101] как функция от пористости, содержания влаги и начального значения данного свойства у свежего продукта. Поскольку эта формула является отношением, влияние температуры не учитывается.

$$\frac{k_d}{k_0} \left( \frac{1}{1-\varepsilon} \right) - 1,82 - 1,66 \exp \left( -0,85 \frac{w_w}{w_{w0}} \right), \quad (11.116)$$

где  $k_0$  и  $k_d$  — теплопроводности свежих и высушенных продуктов;  $w_{w0}$  и  $w_w$  — соответственно массовая доля воды в них.

Формула 11.116 отлично согласуется с данными по 122 контрольным точкам (известным по литературе) для яблок, говядины, картофеля и кальмаров.

## 11.3 Реологические свойства

Реологию можно определить как науку, изучающую деформацию и течение физических тел [34]. Все материалы — и твердые, и жидкие — в идеальном случае обладают полным набором реологических свойств, однако с практической точки зрения и при данном наборе условий можно использовать классификацию, приведенную в табл. 11.9.

Понятие течения больше относится к жидкостям, например, фруктовым сокам, а понятие деформации — к твердым веществам, например, твердым сырам. Те материалы, которые не являются ни твердыми, ни жидкими, а обладают свойствами и тех, и других веществ, считаются вязкоэластичными — например, йогурт. Измерение или

Таблица 11.9. Классификация материалов с реологической точки зрения

Реологическое поведение	Тип	Определяющее уравнение	Примечания
<b>Твердые тела:</b>			
– абсолютно жесткие	Евклидовый	$\gamma = 0$	
– упругие	По Гуку	$\tau = G\gamma$	$G$ — модуль Юнга
	Не по Гуку	$\tau = G(\gamma)\gamma$	Нелинейное поведение
<b>Вязкоупругие:</b>			
– идеальные жидкости	Паскалевый	$\tau = 0$	
– линейные вязкие жидкости	Ньютоновый	$\tau = \mu \dot{\gamma}$	$\mu$ — вязкость
– нелинейные вязкие жидкости	Неньютоновый	$\tau = \eta(\dot{\gamma}, t) \dot{\gamma}$	$\eta$ — кажущаяся вязкость
– вязкие твердые тела	Модель Максвелла	$\sigma + \lambda d\sigma/dt = \eta d\gamma/dt$	$\lambda = \eta/G$ (время релаксации)
	Модель Кельвина	$d\gamma/dt + \sigma/\lambda = \sigma/\eta$	

прогнозирование реологических свойств пищевых продуктов очень важно для проектирования и оптимизации технологических процессов, а также для контроля качества пищевых продуктов.

### 11.3.1 Основные понятия

Для правильного понимания кинетики деформации и течения следует определить такие понятия, как напряжение, деформация, скорость деформации и т. п. Для тех специалистов, кто занимается анализом реакций типа «напряжение–деформация», необходимо знать тензорное исчисление. Для выяснения физического смысла напряжения и деформации приводятся обычно простейшие случаи деформации и потока. Точное определение этих понятий можно найти в хорошо известных работах [10] и [34].

Рассмотрим тело в форме куба со стороной, равной единице, и его реакцию на воздействие внешней силы. В этих условиях внутренняя сила, действующая на единицу площади ( $F/A$ ) называется напряжением. Здесь напряжение является функцией от направления и величины приложенной силы и плоскости, в которой она действует. Следовательно, в трехмерном пространстве напряжение будет полностью определяться тензором с девятью компонентами. В любом материале, наполняющем данный объем, существует два типа напряжений:

- *нормальные напряжения*  $\sigma$ , действующие перпендикулярно сторонам куба и
- *напряжения сдвига*  $\tau$ , действующие тангенциально к сторонам куба (*касательные напряжения*).

Тензор напряжения в данной точке некоторого тела будет иметь девять компонентов, определяемых следующей матрицей ( $3 \times 3$ ):

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}, \quad (11.117)$$

где  $\sigma_{ij}$  и  $\tau_{ij}$  — нормальное напряжение и напряжение сдвига в направлениях осей  $x, y, z$  декартовой системы координат соответственно.

Для некоторого изотропного, однородного и сплошного тела  $\tau_{ij}$  не является независимой величиной, и компоненты напряжений, действующие на противоположных сторонах воображаемого куба, идентичны, так что  $\tau_{yx} = \tau_{xy}$ ,  $\tau_{zx} = \tau_{xz}$ ,  $\tau_{zy} = \tau_{yz}$ <sup>1</sup>. Когда тело подвергается изотропному давлению в виде нормального напряжения, оно может быть деформировано с изменением его объема, но не формы. Подобные деформации называют сжатием (объем уменьшается) или расширением (объем увеличивается). Деформация — это относительное изменение размеров тела под влиянием напряжений (нагрузки). Различные нагрузки приводят к различным деформациям. Нормальное напряжение  $\sigma$  и касательные напряжения  $\tau$  производят линейную дефор-

<sup>1</sup> Закон парности касательных напряжений  $\tau_{ij} = \tau_{ji}$  справедлив для любой сплошной однородной среды (в том числе и анизотропной). — Прим. науч. ред.

мацию  $\epsilon$  и деформацию сдвига  $\gamma$ . Для сплошного однородного тела тензор деформации имеет вид:

$$\epsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \frac{\gamma_{xy}}{2} & \frac{\gamma_{xz}}{2} \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} & \epsilon_{yy} & \frac{\gamma_{yz}}{2} \\ \frac{\gamma_{xz}}{2} & \frac{\gamma_{yz}}{2} & \epsilon_{zz} \end{bmatrix}. \quad (11.118)$$

В случае идеального упругого тела деформация появляется и исчезает мгновенно при устранении напряжения и восстановлении первоначальной геометрии тела. Между напряжением (нагрузкой) и деформацией существует линейная зависимость. Такие тела подчиняются закону Гука и реологически представлены некоторой упругостью с некоторой постоянной, или в виде модуля, определяемого как отношение напряжения (нагрузки) к деформации [92].

Модуль Юнга:  $E = \sigma / \epsilon = \sigma_{xx} / \epsilon_{xx}$

Модуль сдвига:  $G = \tau / \gamma = \tau_{xy} / \gamma_{xy}$ . (11.119)

Объемный модуль упругости:  $K = \frac{\sigma_{\text{ср}}}{\theta}$ ,

где  $\sigma_{\text{ср}} = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}}{3}$ ,  $\theta$  — относительное изменение объема, равное  $\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}$ ;

$\sigma_{\text{ср}}$  — среднее нормальное (гидростатическое) напряжение.

Практически последний случай — это гидростатическое состояние напряжения, когда сила изотопно прилагается со всех направлений, а тело уменьшается в объеме без изменения его формы. Если наш куб нагружается только в одном направлении, например, по оси  $x$ , тензор напряжения дает:  $\sigma_{ij} = \sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \tau_{ij} = 0$ . Растяжение в плоскости  $x$  сопровождается сжатием в плоскостях  $y$  и  $z$ . В этих условиях тензор деформаций задается как

$$\epsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & -\mu \epsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & -\mu \epsilon_{xx} \end{bmatrix}, \quad (11.120)$$

где

$$\mu = -\frac{\epsilon_{yy}}{\epsilon_{xx}} = -\frac{\epsilon_{zz}}{\epsilon_{xx}} = \frac{-(\delta D / D)}{\delta L / L} \quad (11.121)$$

является хорошо известным коэффициентом Пуассона, дающим  $1/2$ , если объем материала после приложения этого простого напряжения остается неизменным. В уравнении (11.121)  $\delta D$  и  $\delta L$  являются соответственно боковым сжатием и расширением по длине. Соотношения между этими модулями, будучи примененными к пластичному сплошному однородному телу, согласно [92] равны:

$$\begin{aligned} G &= E/2(1 + \mu); \\ E &= 3K/(1 - 2\mu); \\ K &= EG/(9G - 3E). \end{aligned} \quad (11.122)$$

Рассмотрим теперь некоторую тангенциальную силу  $F$ , приложенную к верхней поверхности таким образом, что все точки данного куба, за исключением основания, смещаются со своих исходных положений. В ходе такого простого смещения сдвиг  $\gamma$  равен углу сдвига, и только компоненты  $\epsilon_{xy} = \gamma/2$  будут не равны нулю.

### 11.3.2 Жидкие и полужидкие пищевые продукты

Жидкие и полужидкие пищевые продукты представляют собой продукты с разнообразным реологическим поведением — от ньютоновых до зависящих от времени и вязкоупругих. Когда в некотором идеально пластичном теле при приложении к нему напряжения сдвига осуществляется пластичное смещение, в жидкости наблюдается вязкий поток. Что происходит при приложении простого напряжения сдвига ( $\tau$ ) к жидкости, показано на рис. 11.2.

Как видно из рисунка, жидкость находится между двумя параллельными бесконечными плоскостями, и верхняя перемещается относительно плоскости основания со скоростью  $U$  (длина/время). Сила, требуемая для поддержания этого движения, вызывает вязкое течение, и развивается некоторый градиент скорости, равный скорости сдвига ( $\dot{\gamma} = dU/dx$ ). При этих условиях

$$\dot{\gamma} = \tau/\eta_{app}, \quad (11.123)$$

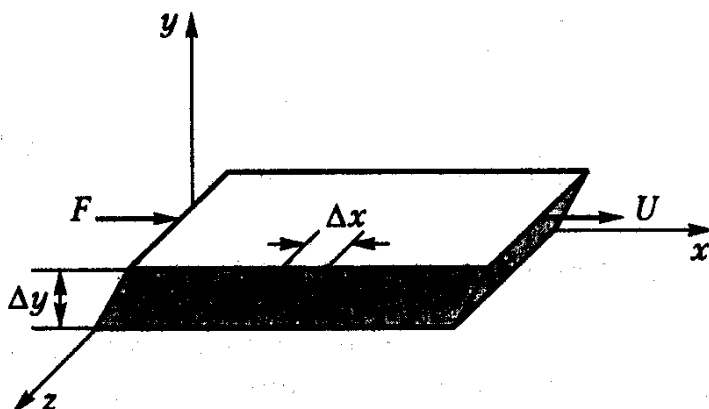


Рис. 11.2. Простой сдвиг



где  $\eta_{app}$  называют кажущейся вязкостью, которая постоянна только для этого единственного значения  $\dot{\gamma}$ . Если  $\eta_{app}$  постоянна при различных значениях  $\dot{\gamma}$ , то

$$\tau = \mu \dot{\gamma}, \quad (11.124)$$

где  $\mu$  — ньютоновская вязкость данной жидкости.

### 11.3.3 «Ньютоновские» пищевые продукты

Ньютоновское поведение говорит о том, что вязкость данного пищевого продукта не зависит от сдвига (рис. 11.2). Ньютоновские жидкости представлены водой, растворами сахара и растительными маслами. Вязкость «ньютоновских» пищевых продуктов измеряется в Паскаль-секундах (Па · с) или в пуазах, равных 1 г/(см · с). Приведенные ниже определения представляют интерес для изучения реологических свойств пищевых продуктов вообще и пищевых суспензий и макромолекулярных растворов в частности.

#### Кинематическая вязкость

$$\nu = \mu / \rho \text{ (см}^2/\text{с, стокс)}^1,$$

где  $\rho$  — плотность.

#### Относительная вязкость

$$\mu_r = \mu / \mu_0,$$

отношение вязкости растворенного вещества к вязкости растворителя при одной и той же температуре.

#### Удельная вязкость

$$\mu_{sp} = \mu_r - 1.$$

#### Приведенная вязкость

$$\mu_{red} = \mu_{sp} / c,$$

где  $c$  — концентрация растворенного вещества.

#### Внутренняя вязкость

$$[\mu] = \lim_{c \rightarrow 0} \frac{\ln \mu_r}{c},$$

которую также называют характеристической. Она является числом, ограничивающим вязкость, ее обычно соотносят с молекулярным весом.

### 11.3.4 «Неньютоновские» пищевые продукты

Большинство представляющих для нас интерес пищевых продуктов характеризуются более сложной связью между скоростью течения и напряжением сдвига. Поэтому

<sup>1</sup> В России принято мм<sup>2</sup>/с. — Прим. науч. ред.

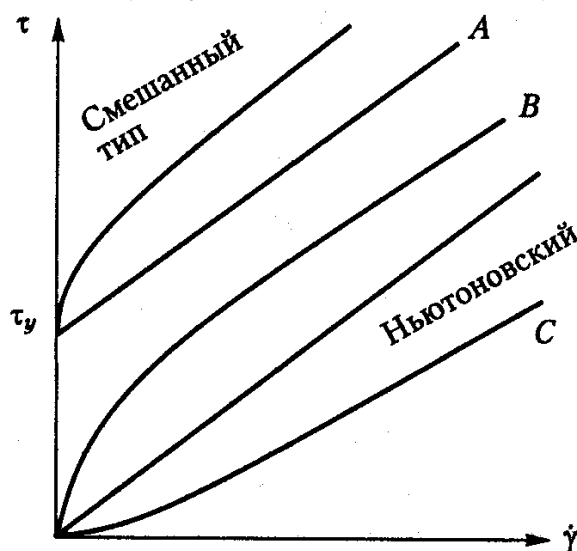


Рис. 11.3. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига

становится неудобно пользоваться понятием вязкости, так как значение  $\eta$  изменяется в зависимости от скорости сдвига. Из табл. 11.9 видно, что для неньютоновских жидкостей  $\eta$  может быть, а может и не быть функцией продолжительности сдвига  $t$ . Такие жидкости обычно подразделяют на три основных класса:

- 1) жидкости со свойствами, не зависящими от продолжительности сдвига,
- 2) жидкости со свойствами, зависящими от продолжительности сдвига и
- 3) жидкости, демонстрирующие свойства твердого тела.

#### 11.3.4.1 Неньютоновские пищевые продукты со свойствами, не зависящими от продолжительности сдвига

К этому классу относится большинство пищевых продуктов, и их классифицируют следующим образом.

**Вязкие пищевые продукты, подчиняющиеся закону Бингама.** Они отличаются от ньютоновских жидкостей только тем, что кривая зависимости между  $\dot{\gamma}$  и  $\tau$  не проходит через начало координат (кривая A, рис. 11.3). Значение  $\tau$  при  $\dot{\gamma} = 0$  является напряжением текучести или пределом текучести  $\tau_y$ . Пищевые продукты, характеризующиеся подобным поведением, называют идеально-пластичными материалами или телами Бингама (например, жидкий шоколад).

**Псевдопластичные пищевые продукты.** К ним относится большинство неньютоновских пищевых продуктов, и их поведение характеризуется кривой B (рис. 11.3). Если продукт псевдопластичен, то его поведение при напряжениях выше предела текучести называют пластичностью смешанного типа. Псевдопластичные жидкости представлены фруктовыми пюре, сгущенным молоком, кетчупом и другими продуктами, чувствительными к напряжению сдвига.

**«Дилатантные» (упрочняющиеся) пищевые продукты.** Их реологическое поведение обратно псевдопластичным продуктам, что видно из кривой C (рис. 11.3).

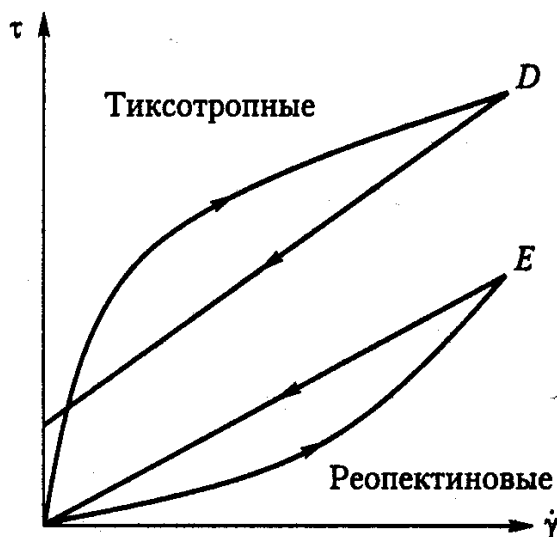


Рис. 11.4. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига

#### 11.3.4.2 Неньютоновские пищевые продукты со свойствами, зависящими от продолжительности сдвига

Пищевые продукты со свойствами, зависящими от продолжительности сдвига, обычно классифицируют на:

- **тиксотропные пищевые продукты**, к которым относят продукты, нарушение структуры которых является функцией как времени, так и  $\dot{\gamma}$ . При постоянной скорости сдвига значение напряжения сдвига уменьшается со временем, а структура разрушается. Типичный график поведения тиксотропной жидкости приведен на рис. 11.4;
- **реопектиновые пищевые продукты**, к которым относят материалы, способные после приложения к ним напряжения сдвига при постоянном  $\dot{\gamma}$  восстанавливать свои начальные характеристики. Этим поведением не отличается ни один пищевой продукт, но им характеризуются некоторые материалы типа бентонитовых веществ, используемых в пищевых технологиях. График реопектинового поведения также приведен на рис. 11.4.

### 11.3.5 Полутвердые пищевые продукты

Многие пищевые продукты (например, сыры) при воздействии на них внезапного и мгновенного напряжения сдвига характеризуются как свойствами твердого тела (пластичностью), так и жидкого (вязкость). Это проявляется, когда испытание проходит в течение некоторого продолжительного времени и напряжение достаточно велико, чтобы предотвратить появление чисто пластических характеристик. В течение подобных жидкостей появляются нормальные напряжения  $\sigma$ , которые и приводят к некоторым необычным явлениям — например, эффекту Вайссемберга [34], когда проявляется тенденция к линейным завихрениям внутри жидкости. У упругопластичных жидкостей, подчиняющихся линейному закону, отношение напряжение–деформация зависит только от времени, а у жидкостей, не укладывающихся в линейную зависимость, это отношение является также функцией от напряжения. В большин-

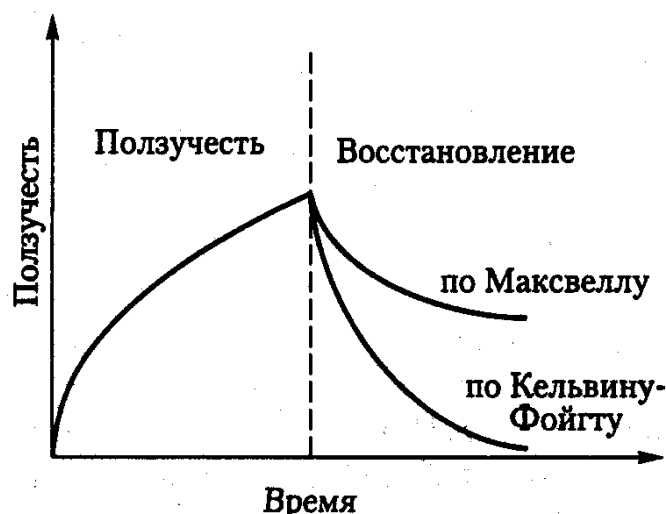


Рис. 11.5. Типичная кривая ползучести

стве реологических исследований полутвердых пищевых продуктов предполагается линейное поведение их текучести. Упругопластические свойства пищевых продуктов выявляют обычно с помощью двух тестов: на релаксацию напряжений и на ползучесть.

#### 11.3.5.1 Модуль ползучести

Увеличение деформаций в полутвердых веществах со временем называют *ползучестью*, а отношение этой деформации к постоянному напряжению — модулем ползучести.

$$J(t) = \gamma / \tau. \quad (11.125)$$

Зависимости модулей ползучести от времени бывают очень полезны в изучении линейного вязкоупругого поведения. После периода стабилизации деформации модуль ползучести со временем начинает вести себя линейно. Типичная кривая ползучести (рис. 11.5) может быть разделена на три главных участка [103] (см. рис. 11.4):

1. Участок *A–B* — участок *мгновенного модуля*  $J_0$ , где границы между различными структурными единицами образца эластично растягиваются. На этом участке структура образца после снятия приложенного напряжения полностью восстанавливается:

$$J_0 = 1/E_0 = \gamma_0 / \tau, \quad (11.126)$$

где  $E_0$  — мгновенный модуль упругости, а  $\gamma_0$  — деформация при  $t = 0$ .

2. Участок *B–C* — участок, где эти границы разрываются и восстанавливаются, но с разной скоростью. Для этого участка существует уравнение:

$$J_R = J_m [1 - \exp(-t/\tau_m)]. \quad (11.127)$$

В уравнении (11.127)  $J_m$  — средний модуль ползучести всех границ, а  $\tau_m$  — среднее время задержки;  $\tau_m = J_m \eta_m$ , где  $\eta_m$  — средняя вязкость. Более подробно об этом см. [103].

3. Последний участок  $C-D$  определяют как *линейную область ньютонова течения*, где модуль  $J_m$  и вязкость связаны соотношением:

$$J_N = t / \eta_N = \gamma_N / \tau, \quad (11.128)$$

где  $\gamma_N$  — деформация на этом линейном участке;  $\eta_N$  — вязкость на этом участке.

Так как в точке  $D$  происходит снятие напряжения, существует некоторый участок восстановления  $D-E$  тела под нагрузкой, за которым следует участок задержанного восстановления пластичности  $E-F$ . Нетрудно заметить, что начальная структура восстанавливается не полностью. В работе [24] восстановленный сдвиг определен как максимальное значение деформации, восстановленной после приложения данной нагрузки:

$$S_r = \tau_{ec}, \quad (11.129)$$

где  $\tau$  — приложенная нагрузка, а  $J_{ec}$  — значение прямолинейного участка порога ползучести, экстраполированное на нулевое время.

Сумма уравнений 11.126–11.128 дает аппроксимацию к полной кривой зависимости порога ползучести от времени (рис. 11.4). Модуль сдвига  $G$ , также определяется [24] как обратная величина ползучести  $J_{eo}$  в устойчивом состоянии.

Вязкоупругие тела обычно описывают с помощью механической модели. Основными элементами подобных моделей являются спиральная пружина (закон Гука) и демпфер. Когда все эти элементы расположены последовательно, они образуют модель Максвелла. Параллельно расположенные пружина и демпфер формируют тело Кельвина–Фойгта. Линейное вязкопластичное поведение может быть приближенно представлено, например, последовательным соединением пружины с телом Кельвина–Фойгта и демпфером.

### 11.3.5.2 Релаксация напряжений

Если деформация сохраняется постоянной, а напряжения уменьшаются со временем, то такое реологическое поведение называют *релаксацией напряжений*. Когда у тела Максвелла поддерживается постоянная деформация, напряжение в любой момент времени равно

$$\tau(t) = \tau_0 \exp(-tG/\eta), \quad (11.130)$$

где модуль  $G$  берется из формулы (11.122).

Иные модели релаксации напряжений, представляющие более сложные виды упругопластичного поведения, приведены в работах [92, 103].

## 11.3.6 Динамические свойства пищевых продуктов

Во всех до сих пор рассмотренных способах исследований пищевые продукты подвергались пошаговым изменениям  $\gamma$  (или  $\tau$ ) и измерениям напряжений (или деформаций) как функции от времени. В изучении реологии пищевых продуктов полезной

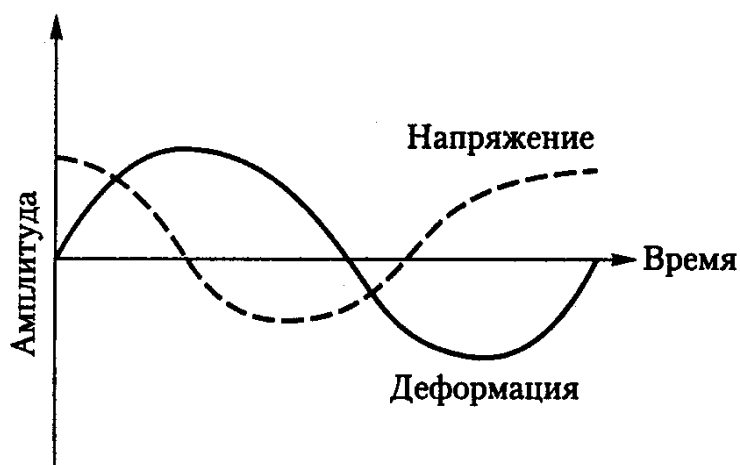


Рис. 11.6. Реакция пищевых продуктов на динамический тест

процедурой являются испытания на периодическое деформирование. Если реологическое поведение изучается в динамике, напряжение или деформации меняются со временем синусоидально с заданной частотой  $\omega$ . Использование подобных динамических тестов пищевых продуктов сопровождается разработкой относительно дешевых динамических реометров. Осцилляция — это неразрушающий метод исследования структуры пищевых продуктов, идеально подходящий для измерения структурных изменений (например, образования геля или тиксотропного восстановления). Подобно ползучести, это дает информацию и о вязкоупругом поведении. Благодаря применению таких методов (особенно полезных для малых значений времени) были определены некоторые реологические свойства пищевых продуктов [11, 12, 87]. На рис. 11.6 приведены типичные синусоидальные изменения напряжений и деформаций:

$$\gamma^* = \gamma_0 \sin(\omega t), \quad (11.131)$$

где  $(\gamma^*)$  — комплексная деформация. Если амплитуда этой комплексной деформации  $\gamma_0$  достаточно мала, напряжение сдвига может быть записано как

$$\tau^* = \tau_0 \sin(\omega t + \delta), \quad (11.132)$$

где  $\tau^*$  — комплексное напряжение;  $\tau_0$  — амплитуда напряжения сдвига;  $\delta$  — фазовое смещение деформации.

Уравнения (11.131) и (11.132) могут быть преобразованы к функциям, имеющим ясный физический смысл. Таким образом,  $\tau^*$  может быть записана как сумма слагаемых, находящихся в фазе и вне фазы с деформацией:

$$\tau^* = \gamma_0 [G' \sin(\omega t) + G'' \cos(\omega t)], \quad (11.133)$$

$$\tau^* = \gamma_0 [\eta' \sin(\omega t) + \eta'' \cos(\omega t)], \quad (11.134)$$

где  $G'$  и  $G''$  из уравнения (11.133) называются соответственно модулями сохранения и потери сдвига; в уравнении (11.134)  $\eta' = G' / \omega$  — отношение внутрифазового напряжения с данной деформацией к скорости деформации;  $\eta'' = G'' / \omega$  — вне-

фазового напряжения под углом  $90^\circ$  с данной деформацией, деленного на скорость деформации.

Абсолютная амплитуда комплексной вязкости равна

$$\eta^* = (\eta' + \eta'')^{1/2}. \quad (11.135)$$

Уравнения (11.132) и (11.133) могут быть сведены к системе

$$G'(\omega) = (\tau_0 / \gamma_0) \cos \delta, \quad (11.136)$$

$$G''(\omega) = (\tau_0 / \gamma_0) \sin \delta. \quad (11.137)$$

Можно найти также комплексный модуль:

$$|G^*| = (G'^2 + G''^2)^{1/2}. \quad (11.138)$$

И, наконец, комплексный модуль ползучести определяется как

$$J^* = J' - iJ'', \quad (11.139)$$

где  $J'$  — ползучесть сохранения, которая является мерой сохраненной и восстановленной энергии в каждом цикле;  $J''$  — потеря ползучести, которая является мерой энергии, выделенной в качестве тепла за каждый цикл [103].

Изменения  $G'$  и  $G''$  с изменением содержания влаги использовались для изучения характеристик геля [27, 97]. Если  $G' \gg G''$ , пищевой продукт ведет себя как твердое тело; если же  $G'' \gg G'$ , энергия, используемая на деформирование пищевого продукта, расходуется на его течение. Подробнее о поведении вязкоупругих тел см. [91].

## 11.4 Прогнозирование и корреляция реологических свойств

В отсутствие надежных экспериментальных данных по реологическим свойствам обеспечить точные оценки для их инженерных применений могут эмпирические модели. Пищевые продукты в своем большинстве являются сложными комплексными системами. На их реологические свойства влияют различные факторы — например, содержание воды, химические (биохимические) реакции. При применении моделей, разработанных для непивевых продуктов, необходима их предварительная корректировка.

### 11.4.1 Пищевые продукты «ньютоновского» типа

В случае «ньютоновских» веществ реологическое поведение полностью описывается их вязкостью  $\mu$ . Жидкие пищевые продукты, следующие этой простейшей реологической модели, — это, в частности, сахарные сиропы, молоко, пиво, фруктовые соки

(без мякоти), растительные масла, топленые животные жиры и некоторые сорта меда. Вязкость ньютоновских жидкостей описываются во всем диапазоне  $\dot{\gamma}$  при постоянной температуре с помощью уравнения

$$\mu = \tau / \dot{\gamma}. \quad (11.140)$$

## 11.4.2 Вязкость растворов и некоторых пищевых систем

Пусть некоторая система типа пищевой эмульсии или дисперсной среды представляет собой смесь жидкости и твердых частиц, которую можно транспортировать ламинарным потоком [40]. Принимая, что частицы имеют сферическую форму, что они не несут электрического заряда и являются относительно крупными по сравнению с молекулами жидкости, а также что отсутствует «проскальзывание» этих частиц и турбулентность жидкости, можно применять простые формулы типа формулы Эйнштейна:

$$\mu_s = \mu_w (1 + 2,5X), \quad (11.141)$$

где  $\mu_s$  — вязкость системы с частицами,  $\mu_w$  — вязкость растворителя,  $X$  — концентрация частиц.

В работе [71] было получено следующее полутеоретическое выражение для оценки относительной вязкости (отношения вязкости  $\mu$  к вязкости растворителя  $\mu_w$ ) концентрированных растворов:

$$\ln \frac{\mu}{\mu_w} = 2,5 \frac{\phi}{1 - K\phi}, \quad (11.142)$$

где  $\phi$  — объемная доля твердых веществ;  $K$  — коэффициент, учитывающий взаимодействие между частицами.

Это уравнение сводится к классическому уравнению Эйнштейна для бесконечно разбавленной взвеси сферических частиц, причем для моодисперсных систем  $K$  варьирует от 0 до 1,9 [71, 79]. Обзор некоторых теорий для большинства систем со взвешенными частицами (эмульсий, дисперсных растворов, гелей и пен), применимых для пищевых продуктов, дан в работах [53] и [88].

## 11.4.3 «Неньютоновские» пищевые продукты

### 11.4.3.1 Модели, независимые от времени

Уравнение реологии Оствальда-де-Веле или степенной закон широко распространено в описаниях реологического поведения системы в отсутствие предела текучести ( $\tau_y$ ):

$$\tau = k\dot{\gamma}^n, \quad (1.143)$$

где  $k$  — коэффициент консистенции;  $n$  — показатель степени для течения жидкости.

При  $n < 1$  пищевой продукт ведет себя как псевдопластичный; при  $n > 1$  пищевой продукт ведет себя как дилатантный. Можно убедиться, что  $\eta = k \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$ . Имеют ме-



сто следующие ограничения: 1) если  $n \rightarrow 0$  и  $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ , то  $\eta \rightarrow \infty$ ; 2) если  $n \rightarrow \infty$  и  $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$ , то  $\eta \rightarrow 0$ .

Когда  $\tau$  меньше предела текучести, неподвижный пищевой продукт может перемещаться только как твердое тело или оставаться неподвижным. Это явление учитывается в нескольких моделях, самыми простыми из которых для этой категории жидкостей являются модели Бингама–Шведова (11.144), Гершеля–Балкли (11.145) и Кассона (11.146) [13]:

$$\tau = \tau_y + \eta \dot{\gamma} \quad (\tau > \tau_y), \quad (11.144)$$

$$\tau = \tau_y + K \dot{\gamma}^n, \quad (11.145)$$

$$\tau^{1/2} = \tau_y^{1/2} + K \dot{\gamma}. \quad (11.146)$$

В литературе приводится и много других моделей, например, модель Мизрахи–Берка [69]:

$$\tau^{1/2} = \tau_y^{1/2} + K_M \dot{\gamma}^n, \quad (11.147)$$

применяемая для характеристики концентрированного апельсинового сока, или уравнение Вокадло и Янга [118]

$$\tau = \left( \tau_y^{1/n} + K \dot{\gamma} \right)^n, \quad (11.148)$$

используемое для описания реологических свойств жиров.

#### 11.4.3.2 Модели, зависящие от времени

Характеристики сложных зависящих от времени потоков жидкостей и «полутвердых» веществ рассматриваются в работах различных авторов [32, 36, 105, 113]. Имеются вполне пригодные реологические модели тиксотропных жидких пищевых продуктов, у которых кажущаяся вязкость меняется со временем и которые с увеличением продолжительности сдвига становятся более жидкими. Тиксотропное поведение некоторых пищевых систем иногда описывают в терминах модифицированного тела Бингама, которое удовлетворяет кинетическому уравнению первого порядка типа

$$\tau = \tau_e + (\tau_0 - \tau_e) \exp(-Kt), \quad (11.149)$$

где  $\tau$  — напряжение сдвига;  $\tau_e$  — равновесное значение  $\tau$ , достигаемое после достаточно продолжительного времени сдвига, Па;  $\tau_0$  — начальное напряжение сдвига, Па;  $K$  — определяемый параметр,  $\text{с}^{-1}$ ;  $t$  — продолжительность сдвига, с.

Для описания реологического поведения, зависящего от времени, используются также модель Хана и др. [36] (уравнение 11.150) и модель Тиу и Богера [113] (уравнение 11.151).

$$\log(\tau - \tau_e) = A_1 - A_2 t, \quad (11.150)$$

где коэффициенты  $A_1$  и  $A_2$  — определяемые константы. В уравнении 11.151  $\lambda$  — зависящий от времени структурный параметр, который следует определять экспериментально.

$$\tau = \lambda(\tau_y + k\dot{\gamma}^{1/2}). \quad (11.151)$$

Уравнение (11.151) было предложено для определения реологических свойств майонеза.

#### 11.4.4 «Полутвердые» пищевые продукты

Применение вышеизложенных реологических моделей основывалось на предположении, что деформации в тех или иных пищевых продуктах являются невосстановимыми, то есть им не свойственно упругое поведение. «Полутвердые» пищевые продукты типа сыра или теста по своей природе не являются чисто вязкими, и их вязкоупругое поведение может быть механически описано путем сочетания упругой пружины и демпфера (чисто вязкий поток). Последовательное расположение этих двух элементов образует тело Максвелла (уравнение 11.152), а параллельное — тело Кельвина–Фойгта (уравнение 11.153):

$$\sigma + \lambda \frac{d\sigma}{dt} = \eta \frac{d\gamma}{dt}, \quad (11.152)$$

$$\frac{d\gamma}{dt} + \frac{\sigma}{\lambda} = \frac{\sigma}{\eta}. \quad (11.153)$$

Следует подчеркнуть, что применение этих моделей и их совместное использование возможно лишь в диапазоне линейной вязкоупругости. Эмпирическое уравнение для анализа кривых релаксации напряжений было предложено в работе [78]:

$$t\sigma_0 / (\sigma_0 - \sigma(t)) = k_1 + k_2 t, \quad (11.154)$$

где  $\sigma_0$  — значение напряжения в начале периода релаксации;  $k_1$  и  $k_2$  — параметры.

Прочие механические модели, представляющие упругопластичное поведение тех или иных пищевых продуктов, приведены в работах [14, 54, 91, 102].

Вопросы ползучести и релаксации продолжают находиться в центре внимания исследователей свойств пищевых продуктов, и в этой области было проведено достаточно много экспериментов. Так, в работах [12] и [68] проведено сравнение реологических параметров, полученных изучением статического сдвига и динамических вязкоупругих свойств. Было выведено так называемое «правило Кокс–Мерца» (Cox-Merz), утверждающее, что одинаковая амплитуда  $\eta_{app}$  и  $\eta^*$ , полученная при одинаковых значениях  $\dot{\gamma}$  и  $\omega$  соответственно, подтверждается для биополимеров, но не срабатывает у сложных, агрегированных пищевых продуктов [89]. В работе [49] были получены полные определения малоамплитудных осцилляторных свойств, а также значения динамических параметров пищевых продуктов. Была также разработана

модель для имитации роста переходного напряжения сдвига в полутвердых пищевых продуктах, основанная на модели Лейдера и Берда (*Leider and Bird*) [53]:

$$\tau = k\dot{\gamma}^n \left[ 1 + b_0 \dot{\gamma}^{(n-1)} \right] \frac{\sum b_i \exp\left(-\frac{t}{\lambda_i}\right)}{\sum b_i}, \quad (11.155)$$

где  $k$  и  $n$  — параметры степенного закона;  $\lambda_i$  — константа времени;  $b_0$  и  $b_i$  — константы.

Полезные соотношения между вязкостями  $\eta^*$ ,  $\eta'$  и  $\eta$  (устойчивой) имеются для разных пищевых продуктов [11, 12].

### 11.4.5 Пищевые продукты — гели

Пищевые гели состоят из полимеризованных молекул, как правило, полисахаридов и белков, связанных между собой крест-накрест так, что получается взаимосвязанная сеть, пропитанная водой. Гелирование компонентов пищевых продуктов возникает преимущественно из-за взаимодействий полимер-полимер. Такие гели проявляют свойства, присущие твердым телам [27]. В этой работе был сделан вывод, что для создания полной реологической характеристики таких гелей требуются измерения как в статике, так и в динамике. Линейная модель, удовлетворяющая кривой релаксации пектиновых гелей, представлена формулой

$$\sigma(t) = \sigma_1 \exp(-t/\tau_1) + \sigma_2 \exp(-t/\tau_2), \quad (11.156)$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  — значения напряжения во время  $t = 0$  в модели, образованной двумя параллельными телами Максвелла.

### 11.4.6 Зависимость реологических параметров пищевых продуктов от температуры и давления

Зависимость вязкость-температура довольно часто представляют уравнением Аррениуса:

$$\ln \eta = A + \frac{\Delta E_\eta}{RT}, \quad (11.157)$$

где  $A$  — константа;  $\Delta E_\eta$  — энергия активации течения;  $R$  — газовая постоянная.

Применяются и иные уравнения, например, эмпирическое [115]:

$$\ln \eta = A' + \frac{B'}{T - T_0}, \quad (11.158)$$

где  $A'$ ,  $B'$  и  $T_0$  — константы.

В процессах переработки пищевых продуктов, когда они подвергаются воздействию высокого давления (например, при экструзии), вязкость может зависеть от давления  $P$  как

$$\mu = \mu_0 e^{aP}, \quad (11.159)$$

где  $\mu_0$  — вязкость при стандартном давлении,  $a$  — параметр данного пищевого продукта.

Для «неньютоновских» пищевых продуктов дополнительно следует определять как параметры также  $\tau$  и  $\dot{\gamma}$ .

## 11.5 Измерение вязкости и реометрия

В данном разделе мы рассмотрим экспериментальные методы, применяющиеся для определения свойств упругопластичных жидкостей — в частности, детально проанализируем методы измерения вязкости (кажущейся вязкости). Работа вискозиметров основана на измерении либо сопротивления течению в капиллярной трубке, либо усилия, приложенного к телу, которое движется относительно жидкости. В продаже имеются три типа вискозиметров, применимых к пищевым продуктам: капиллярные, с падающим шариком и ротационные. В последнее время вискозиметры подешевели. Они позволяют изучить сдвиговое поведение различных систем в широком диапазоне и получить полные реограммы, включая тиксотропное восстановление и релаксацию напряжений, а также проводить осцилляторные эксперименты при программируемом изменении температуры.

Для ньютоновых жидких пищевых продуктов достаточно измерить  $\mu$  как отношение  $\tau/\dot{\gamma}$ . Помимо отношений напряжения сдвига и скорости сдвига, необходимых для описания неньютоновых жидкостей, свойства можно измерять: а) при испытаниях на сжатие (диаграмма сила–деформация); б) на ползучесть (деформация как функция времени и постоянного напряжения); в) на релаксацию (напряжение, требуемое для поддержания постоянной деформации) и г) при динамических испытаниях (деформации, вызванные напряжениями, переменными во времени, — в частности, циклическими напряжениями).

### 11.5.1 Вискозиметры с капиллярной трубкой

Вискозиметр с капиллярной трубкой схематически представлен на рис. 11.7. Подлежащая измерению жидкость помещается в верхний резервуар  $V$ , откуда она выходит через капиллярную трубку  $L$  в результате приложения некоторой силы (силы земного тяготения, давления газа, поршня или частичного разрежения на выходе).

Некоторые основные характеристики таких капиллярных вискозиметров приведены в табл. 11.10 наряду с их принципами действия, сферами применения и ограничениями. Полное описание девяти различных стеклянных капиллярных вискозиметров приведено в работе [45]. Капиллярными вискозиметрами можно считать и вискозиметры Жана (*Zhan*), состоящими обычно из чашечки с отверстием в нижней ее части.

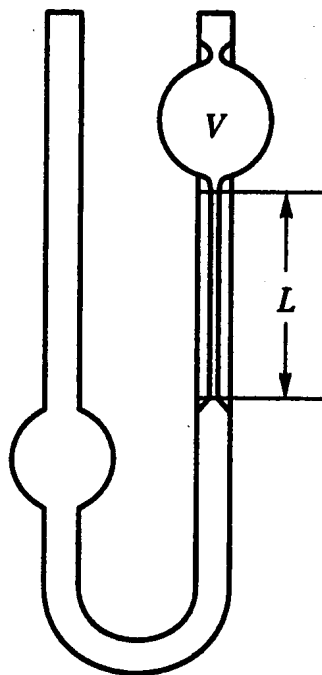


Рис. 11.7. Вискозиметр Оствальда

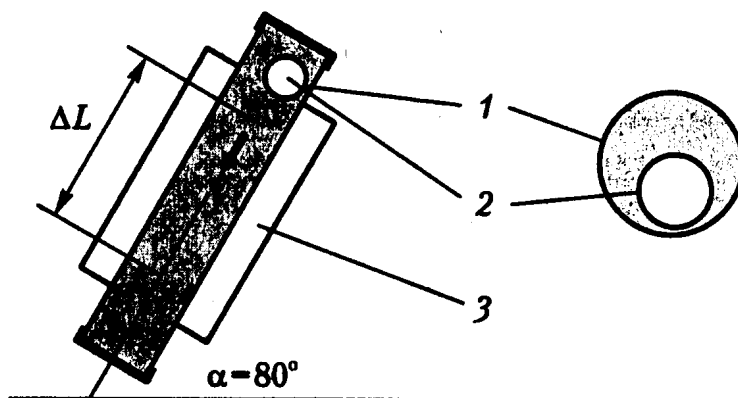


Рис. 11.8. Вискозиметр с падающим шариком

### 11.5.2 Вискозиметры с падающим шариком

Вискозиметры с падающим шариком (рис. 11.8) работают по принципу измерения времени, которое требуется шарiku для прохождения через жидкость под воздействием силы земного тяготения. Скорость перемещения уменьшается при компенсации ускорения земного тяготения трением шарика о жидкость. Разновидностью вискозиметров такого типа является вискозиметр, где шарик перемещается по трубке, наклоненной под некоторым заданным углом. Сводные характеристики вискозиметров с падающим шариком приведены в табл. 11.11.

### 11.5.3 Ротационные вискозиметры

Приборы подобного типа определяют вязкость ньютоновых и неньютоновых жидкостей, помещенных между двумя коаксиально расположенными цилиндрами

Таблица 11.10. Вискозиметры с капиллярной трубкой

Тип	Базовое уравнение	Принцип действия	Сферы применения и ограничения
Стекланный I – Оствальда II – Кэннона–Фенске III – Уббеллоде	$\mu = \pi PR^4 / 8LQ$ $\eta = \pi R^4 g \sigma / [8Lk \times (dQ/dP + Pd^2Q/4dP^2)]$ $\gamma = 4Q/\pi R^3$ $\tau = PR/2L$ $\tau_y = P_0 g r R/2L$	Фиксированный объем образца перетекает из шарика резервуара в шарик приемника, расположенный ниже по уровню (I) в другом плече, или (II) на том же плече; у вискозиметра Уббеллоде имеется дополнительное плечо	Измерение ньютоновых жидких пищевых продуктов только при низких напряжениях сдвига; конструкция Кэннона–Фенске сокращает число ошибок из-за плохой калибровки
Для переменного давления	То же	Существует большое число методов изменения давления (с помощью сжатого газа, насосов и т. п.); в капиллярных реометрах жидкость под напором проходит через трубку с регистрацией давления, требуемого для поддержания постоянного расхода	Для измерения вязкостей ньютоновых и неньютоновых жидкостей в диапазоне от $0,01-5 \cdot 10^6$ мПа до очень высоких напряжений сдвига; точность — от высокой до средней

Примечание:  $P$  — давление,  $L$  — длина капилляра,  $Q$  — поток,  $R$  — радиус капилляра,  $\rho$  — плотность,  $k$  — константа.

Таблица 11.11. Вискозиметр с падающим шариком

Базовое уравнение	Принцип действия	Сферы применения и ограничения
$\eta = K(\rho_1 - \rho_2)t$ $\dot{\gamma}_{\max} = 3\mu / 2R$	Вискозиметр состоит из вертикальной или расположенной под углом стеклянной трубки 1 в которой перемещается шарик 2; измеряется время перемещения шарика между отметками, расположенными на заданном расстоянии $\Delta L$ друг от друга	Применяется для измерения вязкости прозрачных ньютоновых жидкостей; используются шарики, изготовленные из материалов различной плотности: от стеклянных (около $2 \text{ г/см}^3$ ) до стальных (около $8 \text{ г/см}^3$ ); необходимо проверить термостатирование вискозиметра. Диапазон измерения вязкости — от $20 \text{ мПа} \cdot \text{с}$ до $85\,000 \text{ мПа} \cdot \text{с}$

Примечание:  $\dot{\gamma}_{\max}$  — скорость сдвига при угле наклона трубки  $90^\circ$ ;  $K$  — калибровочная константа;  $\rho_1$  — плотность шарика;  $\rho_2$  — плотность жидкости;  $t$  — время падения;  $\mu$  — скорость падения шарика,  $\text{см}^3/\text{с}$ ;  $R$  — радиус трубки.

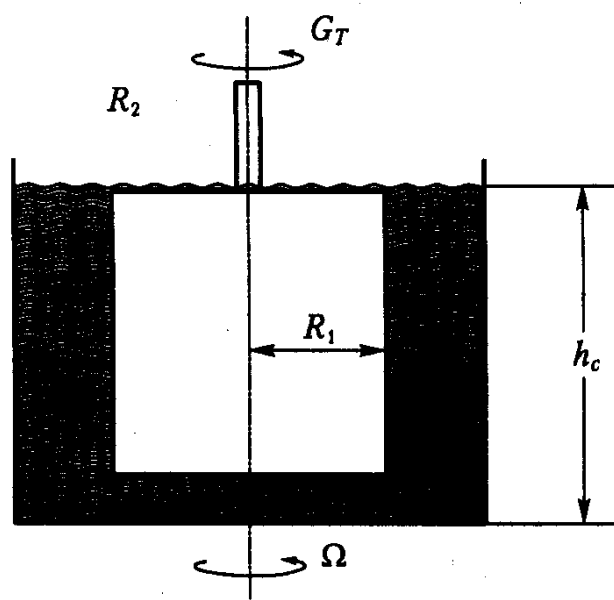


Рис. 11.9. Схема вискозиметра с коаксиальными цилиндрами

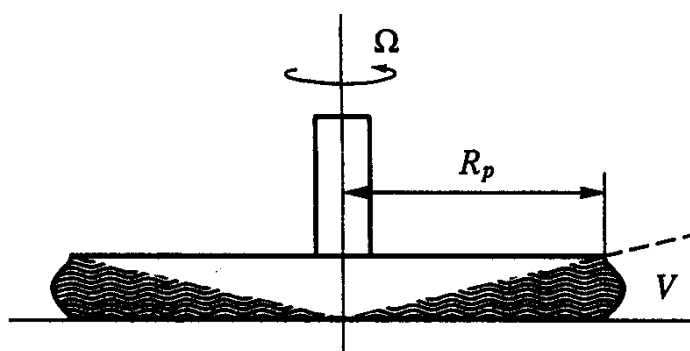


Рис. 11.10. Схема конусно-плоскостного вискозиметра

(рис. 11.9) или расположенных как конус и плоскость (рис. 11.10), измеряя торможение жидкости на мобильном элементе (цилиндре или конусе) при остающемся неподвижным другом элементе (цилиндре или плоскости). После появления в 1890 г. первых работ в этой области [22] появились и другие, посвященные детальному описанию работы подобных вискозиметров (как коаксиально-цилиндрических, так и конусно-плоскостных) [106, 116]. Уравнения, используемые для расчета реологических свойств с помощью ротационных вискозиметров, а также их рабочие характеристики и ограничения приведены в табл. 11.12. В промышленности применяются и некоторые другие эмпирические ротационные вискозиметры — например, «*Bravender Viscocorder*», «*Brookfield Viscometer*» и «*FMC Consistometer*», которые используются в основном при контроле качества, причем подробный математический анализ в этом случае не производится, поскольку не является необходимым.

### 11.5.4 Реометры

Эти приборы легко настраиваются под конкретное применение — например, при увеличении температуры или давления, а также для испытаний «полутвердых» тел.

Таблица 11.12. Ротационные вискозиметры

Тип	Базовое уравнение	Принцип действия	Сфера применения и ограничения
С коаксиальными цилиндрами	$\mu = G_T (1/R_1^2 - 1/R_2^2) / 4\pi h_c \Omega$ $\eta = (\mu L M / G_T) - (D / \Omega) \ln(R_2 / R_1)$ $\dot{\gamma}_{\min} = 2\Omega R_1^2 / (R_2^2 - R_1^2)$ $\dot{\gamma}_{\max} = 2\Omega R_2^2 / (R_2^2 - R_1^2)$ $\tau = (1/R_1^2 - 1/R_2^2) 4\pi h_c$ $\tau_y = \tau G(\Omega \rightarrow 0) / \ln(R_2 - R_1)$	Вискозиметр состоит в основном из двух коаксиально расположенных цилиндров — при вращении одного второй остается неподвижным. В вискозиметре Сэрла ( <i>Searle</i> ) внутренний цилиндр служит ротором, а в вискозиметре Куэта ( <i>Couette</i> ) вращается внешний цилиндр. Вращающий момент $G_T$ необходим для обеспечения постоянной скорости вращения ротора $\Omega$ , является мерой напряжения сдвига $\tau$ ; скорость вращения является мерой скорости сдвига $\dot{\gamma}$ . В вискозиметрах Штормера ( <i>Stormer</i> ) $\dot{\gamma}$ измеряется при постоянной $G_T$ ; в приборах МакМайкла ( <i>McMichael</i> ) измеряется $G_T$ при постоянной $\Omega$ .	Можно измерять вязкость ньютоновых и неньютоновых жидкостей; в некоторых промышленных приборах наблюдается кромоный эффект; в некоторых модификациях прибора можно измерять изменение ползучести со временем, релаксацию напряжений и реологические характеристики полутвердых тел в динамике
Конусно-плоскостной	<p>Для малых <math>\psi</math></p> $\mu = 3G_T \psi / (2\pi R_p^3 \Omega)$ $\dot{\gamma} = \Omega / \psi$ $\tau = 3G_T / (4\pi R_p^3)$ $\tau_y = \tau G(\Omega \rightarrow 0)$	В вискозиметрах подобного типа испытываемая жидкость испытывает сдвиг между вращающимся конусом и неподвижной плоскостью; $\dot{\gamma}$ и $\tau$ являются результатом измерения соответственно $G_T$ и $\Omega$ ; прибор может применяться для циклических испытаний $\eta^*$ ; если прибор может измерять нормальные напряжения, его называют реогониметром; с другой стороны, реометры могут также измерять динамические деформации при подтверждении образца осциллирующему вращению	Прибор пригоден для измерения характеристик ньютоновых и неньютоновых жидкостей при высоких показателях сдвига, однако существует опасность нагревания вследствие трения; кромоный эффект на практике можно пренебречь; пригоден для жидкостей, поведение которых со временем меняется; для анализа пищевых смесей требуется внимательный отбор проб в зависимости от угла конуса и зора

Обозначения:  $G_T$  — момент вращения;  $R_1$  — радиус внутреннего цилиндра;  $R_2$  — радиус внешнего цилиндра;  $h_c$  — высота внешнего цилиндра;  $\zeta$  — угловая скорость вращающегося элемента;  $\psi$  — угол конуса.



Принцип измерения основан на очень низком инерционном моменте вращения двигателя, что практически обеспечивает перенос приложенной нагрузки на испытываемый пищевой продукт без потерь на трение. В состав воспринимающих частей обычно входят конусные и параллельные пластины и коаксиально расположенные цилиндры различных размеров и из разных материалов. Основными достоинствами этих довольно сложных приборов являются возможность автоматической настройки зазора, измерения сил, возможность испытаний при усиленных колебаниях, а также компьютеризированный контроль и управление.

### 11.5.5 Приборы, имеющиеся на рынке

Некоторые имеющиеся на рынке вискозиметры и реогониометры, широко применяющиеся в пищевой промышленности, приведены в табл. 11.13. В большинстве случаев приведенная ниже информация взята из промышленных каталогов, а иногда приводится по данным поставщиков. В столбце «Диапазон» приведены цифры, приводимые в качестве общих пожеланий, и для получения более подробной информации желательно связаться с фирмой-изготовителем. Вся эта информация (табл. 11.13) необходима для предварительного анализа состояния дел, а конкретный выбор того или иного прибора требует дополнительного изучения.

## 11.6 Реологические свойства пищевых продуктов

Большинство напитков и жидких пищевых продуктов (вино, пиво, чай, кофе, осветленные фруктовые соки, газированные напитки и кока-кола, растительные масла, молоко и т. п.) ведут себя как ньютоновы жидкости. Эмпирические и полуэмпирические уравнения, характеризующие вязкость пищевых продуктов, а также показатели по растворенным СВ и температуре, опубликованы в работе [87]. Тем не менее в большинстве жидких пищевых продуктов содержатся вода, водные растворы солей и сахаров, растительные и животные жиры в виде суспензии, а также нерастворимые углеводы и белки с высоким молекулярным весом. Поэтому предварительная оценка вязкости ньютоновых жидкостей может быть произведена относительно вязкости воды  $\mu_w$  и вязкости основных растворенных веществ. Вязкость воды рассчитывается по следующей формуле:

$$\ln \mu_w = 0,266 - 2,02 \cdot 10^{-2} T + 4,4 \cdot 10^{-5} T, \quad (11.160)$$

где  $T$  — температура, °C.

С другой стороны, вязкость растворов сахарозы может быть рассчитана по уравнению [51]:

$$\mu = a \exp(b/T^n), \quad (11.161)$$

где  $\log a = 0,00458X^{1,15} - 3,05$ ;  $b = 9,90 \cdot 10^4 X^{1,51} + 6,1 \cdot 10^7$ .

Диапазоны валидности уравнения (11.161) — температуры  $T$  от 283,2 до 323,2 К и концентрации  $X$  — от 0 до 40 °В. Имеются данные, что влияние концентрации фрук-

Таблица 11.13. Некоторые имеющиеся на рынке вискозиметры и реогиометры, применяющиеся в пищевой промышленности

Наименование и фирма-производитель	Тип	$c^{-1}$	Общее $\tau$ , Па	Диапазон $\eta(\mu)$ , мПа · с	$T, ^\circ C$	Прочие характеристики
<b>RONLIN Instruments</b> Metric Group Ltd., Love Lane, Girencester, GLOUCESTER SHIRE, GL71YG, ENGLAND	Вискозиметр коакс., цилиндр.; реоиметр конусно-пласт., с парал. пласт., коакс.-цилиндр.	$4 \cdot 10^{-4}$ $0,1-10^5$	$0,01-10^4$	$3,8-10^6$	$-20/150$ $-15/250$	Вращ. момент: мин. 0,001 мН, макс. 50 мНм Скорость: 320 рад/с; Частота: $10^{-3}-50$ Гц Автом. тестир. восстановления ползучести Автоматический контроль скорости
<b>BROOKFIELD</b> Brookfield Engn. Lab. Inc, Stoughton, MA, 02072, US	Коакс.-цилиндр.; конусно-пласт., с вращ. шпинделями	0,6-122 0,6-750		$1-64 \cdot 10^6$	$-10/100$	
<b>CANNON®</b> Cannon Instruments Co., PO Box 16, State College, PA, 16801, US	Стеклянный капиллярный вискозиметр			$0,3-10^5$		
<b>Ferranti-Shirley</b> Ferranti Ltd, Moston, England	Конусно-пласт., коакс.-цилиндр.	0,18-1800 0,3-950	$44-1,1 \cdot 10^5$ 0,8-6100	$0,024-62 \cdot 10^3$ $8 \cdot 10^{-4}-2 \cdot 10^4$	200	Автоматический контроль скорости Релаксация напряжений
<b>Gilmont Instrument</b> 401 Great Neck Road, Great Neck, NY, 11021, US	С падающим шариком			0,25-300		

Таблица 11.13. (Продолжение)

Наименование и фирма-производитель	Тип	$\text{с}^{-1}$	Общее $\tau$ , Па	Диапазон $\eta(\mu)$ , мПа · с	$T$ , °C	Прочие характеристики
<b>НААКЕ</b> Gebrüder Haake, Dieselstrasse 4 D75, Karlsruhe 41, Germany	Сирл, Куэтт, падающий шарик; реометры: конусно-пласт., с паралл. пласт., с коакс. цилиндр.	0,01–4 · 10 <sup>5</sup> 0,06–1000	0,04–24 000 0,05–30 000 0,01–19 000	2 · 10 <sup>-9</sup> 0,5–10 <sup>-4</sup> 0,2–10		Автоматический контроль скоро- сти; Р — до 1000 бар; Автом. установка за- зора; -50/950 вращ. момент. мин. 10 <sup>-6</sup> Нм макс. 0,05 Нм Макс. угол: 10 <sup>-6</sup> рад Диапазон давлений 3 · 10 <sup>5</sup> –38 · 10 <sup>5</sup> Па $\omega = 10^{-5}$ –100 Гц
<b>INSTRON INSTRON Ltd.</b> Coronation Road, High Wycombe Bucks HP123SY Great Britain	Капиллярные и ротацион- ные вискозиметры	0,4–1,1 · 10 <sup>-4</sup> ; 2 · 10 <sup>-6</sup> –2,6 · 10 <sup>4</sup>	570–4,3 · 10 <sup>-6</sup> ; 0,9–9,6 · 10 <sup>5</sup>	5 · 10 <sup>-2</sup> –1 · 10 <sup>7</sup> ; 3,5 · 10 <sup>-5</sup> –1,2 · 10 <sup>11</sup>	40/350 400	
<b>PARR PHYSICA</b> Metetchnik GmbH, Vor dem Lauch 6, D70567 Stuttgart, Germany	Реометры с различной гео- метрией					Полная автоматиза- ция; Проверка на полу- честь и частоту осциллирования
<b>Rheomat</b> Contraves AG Zurich, Schaffhauserstrasse 580, Zurich, Switzerland	Конусно-пластинчатые; коаксиально-цилиндр.	0,05–1000	0,2–4 · 10 <sup>3</sup>		30/100	$\omega = 3 \cdot 10^{-5}$ –20 Гц
<b>Rheometrics</b> RHEOMETRICS Inc., spectrometer, Piscataway, NJ, US	Механические спектро- метры конусно-пластинч.	10 <sup>3</sup> –10 <sup>4</sup>	1,6–3200 0,1–1 · 10 <sup>10</sup>	1 · 10 <sup>3</sup> –1 · 10 <sup>10</sup>	-50/400	

Таблица 11.13. (Окончание)

Наименование и фирма-производитель	Тип	$\text{с}^{-1}$	Общее $\tau$ , Па	Диапазон $\eta(\mu)$ , мПа · с	$T, ^\circ\text{C}$	Прочие характеристики
Rheotron Brabender OHG, Duisburg D-4100, Duisburg 1, Kulturstrasse 51-55, Ger- many	Коакс.-цилиндр., конусно-пластинч.	$5-2 \cdot 10^4$	$0,1 \cdot 10^5$	$0,5-10^9$	-30/300	Автоматическое ска- нирование $\omega = 0,01-100$ рад/с
Schott GERAETE GmbH Po- stfach 1130, D-6570 Hofheim, Germany	Стекланные капиллярные С обратным потоком типа Убеллоде типа Канон-Фенске Оствальда	$0,35-3 \cdot 10^5$			-80/150	Полная автоматиза- ция; Цифровая оптоэлек- троника
TA Instrument Ltd. Leatherhead, Surrey, KT227UQ, England	Реометр (Сагги-Med) Различная геометрия; Автомат. настройка зазора Коррекция инерции				-30/150	Вращ. момент: мин. $0,0001$ нНм; макс. $50$ нНм; $\omega = 10^{-4}-50$ Гц Угол, м $2,5$
Weissenberg Sangamo Schlumberger, North Bersted, B. Regis, W. Sussex, PO 22 9B5, England	Реогониометры; конусно-пласт.; С парал. пласт.; С коакс. цилиндр.	$7 \cdot 10^3-9 \cdot 10^3$	$1,9 \cdot 10^{-3}-9 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^{-4}-5 \cdot 10^6$	-50/400	$\omega = 3,1 \cdot 10^{-4}-50$ Гц

товых соков  $X$  при постоянной температуре на их вязкость  $\eta$  может быть представлено экспоненциальным уравнением. Если необходимо оценить и влияние температуры, получается очень сложное уравнение для  $E_\eta$ . В работе [21] уравнение Муни (Mooney) (11.162) было модифицировано так, чтобы можно было выразить концентрацию  $X$  в градусах Брикса ( $^\circ\text{B}$ ) и учесть влияние температуры:

$$\ln \frac{\mu}{\mu_w} = \frac{AX}{100 - BX}, \quad (11.162)$$

где коэффициенты  $A$  и  $B$  являются функциями температуры.

Результирующие коэффициенты вышеприведенного уравнения для яблочного сока и различных растворов сахаров представлены в табл. 11.14. Значения вязкости растворов соли  $\text{NaCl}$ , еще одного важнейшего ингредиента пищевых продуктов, также рассчитываются по формуле [51]:

$$\mu = ae^{\frac{b}{T^n}}, \quad (11.163)$$

где  $\lg a = 0,00359X^{1,33} - 2,00$ ;  $b = 3,09 \cdot 10^5 X^{1,59} + 6,1 \cdot 10^7$ .

В этом уравнении диапазоны валидности по температуре — 283,2–323,2 К, а по концентрации — от 0 до 24 %.

### 11.6.2 Пищевые продукты, характеризующиеся неньютоновым поведением

Большинство пищевых продуктов по своей природе являются неньютоновыми. Тщательному изучению в последние годы подвергались упруго-пластичные и полутвердые пищевые продукты. Реологические характеристики неньютоновых пищевых продуктов давалась в виде кривых  $\tau$  и  $\dot{\gamma}$ , в виде динамических характеристик, влияния времени на  $\eta$  при постоянном  $\dot{\gamma}$  и т. п. Разные авторы сводили эти данные воедино. Так, в работе [102] для описания реологического поведения мороженого была предложена следующая зависимость ползучести от времени:

$$J(t) = J_0 + J_1(1 - e^{-t\tau_1}) + J_2(1 - e^{-t\tau_2}) + \frac{\tau}{\eta}, \quad (11.164)$$

где  $J_0$  — мгновенная упругая ползучесть;  $J_1$  и  $J_2$  — ползучесть вследствие задержанного упругого поведения;  $\tau_1$  и  $\tau_2$  — время задержки вследствие задержанной упругости;  $\eta$  — вязкость течения ньютоновой жидкости.

Уравнение (11.164) — это показательный пример модели описания упруго-пластичного поведения полутвердых пищевых продуктов. Типичные значения реологических параметров для мороженого при 11  $^\circ\text{C}$  задаются уравнением (11.165):

$$J(t) = 10^{-5} + 2,2 \cdot 10^{-5}(1 - e^{1866t}) + 8,9 \cdot 10^{-6}(1 - e^{-144t}) + \frac{t}{6} \cdot 1. \quad (11.165)$$

В работе [27] для оценки ползучести при постоянной нагрузке  $\sigma_0$  было предложено уравнение:

$$\frac{\gamma}{\sigma_0} = \frac{1}{G_0} + \frac{t}{\eta_\infty} + \sum_{i=1}^n \frac{(1 - e^{-t/\tau_i})}{G_i}, \quad (11.166)$$

где  $\tau_i = \eta_i/G_i$ , заданное в нагрузке (напряжении) или другой эквивалентной форме сжатия.

Уравнение (11.166) при  $n = 1$  использовалась для оценки характеристик агара и пектиновых гелей. При  $n = 2$  и 3 получают характеристики других пищевых гелей.

В табл. 11.15 приведены некоторые экспериментальные данные по вязкости, значения степенного закона и другие реометрические параметры различных пищевых продуктов. Кроме того, в табл. 11.16 приведены реологические тесты применительно к типичным пищевым продуктам наряду с условиями их измерения и использовавшимися уравнениями.

Таблица 11.15. Вязкость и другие реологические параметры некоторых пищевых продуктов при комнатной температуре

Пищевой продукт	$\mu$ или $\eta(\dot{\gamma})$ , мПа · с	$n^a$	$k^a$ , Па · с <sup>n</sup>	$\tau_y^b$ , Па	Дополнительные параметры
Соус яблочный		0,15–0,24	40,6–76,9	18,4–50,7	
Масло сливочное		0,042	417,0	1,16	$n = 0,037^a$
Шоколад, крошка (46 °С)		0,574	0,57		$K = 15\,800$
Яйцо (целое)	6,4	0,88			$E_\eta =$ $= 5,89$ ккал/моль
Яичный желток			0,32		
Кетчуп		0,107	79,4		$n = 0,160$ $K = 851$
Майонез		0,050	260		$n = 0,090$
Мясо (жир 30%, белки 10,4%)	254	0,341	160,2	27,8	$K = 637$
Молоко сгущенное		0,834	36,0		
Сок грушевый	1,15				$E_a = 8,2$ ккал/моль
Пектин, 0,5 %об.	4,5 (500 с <sup>-1</sup> )				
Сок томатный концентрированный		0,40	187		
Томатная паста (30 °В)	Сыворотка: 4,3–140	0,28	139–252	78–212	
Эмульсии масло–вода, об. доля 0,32–0,62)		1,06–1,2	0,014–0,071		
Йогурт	43	0,46	1,31	3,97	

Данные по [12, 38, 43, 83, 84, 88] и др.

<sup>a</sup>  $n$  и  $k$  — параметры степенного закона для  $\eta$  отн.  $\Omega$ ; <sup>b</sup>  $\tau$  — предел текучести.

Таблица 11.16. Типичные реологические свойства пищевых продуктов: измерительные приборы и связанные формулы

Пищевой продукт	Измерительный прибор	Используемые формулы	Измеряемые параметры	Диапазоны измерения	Литература
Яблочный сок	Капиллярный вискозиметр	11.8, 11.10	$\mu(X, T)$	$X = 10-75^\circ\text{B}$ $T = 10-80^\circ\text{C}$	
Яблочный соус	Конусно-плоскостной вискозиметр	11.13, 11.14, 11.15	$\tau_y$	Содержание пульпы 86-96% $X = 17^\circ\text{B}$ , $T = 25^\circ\text{C}$	[83]
Масло, сыр, сливки и т. д.	Механический конусно-плоскостной вискозиметр	Динамические свойства	$\eta^*$ $G'$ $G''$	$f = 0,04$ рад $R = 1,25$ см Зазор = 50 $\mu\text{m}$	[11, 12]
Мед	Вискозиметр с падающим шариком	11.8	$\mu(X, T)$	$X = 10-75^\circ\text{B}$ $T = 20-70^\circ\text{C}$	
Фруктовые соки и пюре	Contraves Rheomat	11.8, 11.15, 11.22	$\mu(X, T)$ $\eta(T, X)$	$X = 10-75^\circ\text{B}$ $T = 20-70^\circ\text{C}$	
Фруктовая пульпа	Rheometrics конусно-плоскостной вискозиметр	11.8, 11.13, 11.17	$\tau(\dot{\gamma}, t, T)$	$X = 26-34^\circ\text{B}$ $T = 30-55^\circ\text{C}$	
Резиноподобные вещества	Rheometrics Жидкостный реометр конусно-плоскостной вискозиметр		$\eta^*, \eta', \eta''$	$f = 0,1$ рад; $R = 25$ мм $X = 0,5-3,0\%$ ; $T = 24^\circ\text{C}$ $f = 0,0196$ рад $R = 2,5$ см; зазор = 50 $\mu\text{m}$	[68]
Майонез	Weissenberg Реогониометр	11.6	$\tau(\dot{\gamma})$ $\eta(t)$	$f = 1'23'$ ; $T = 19,5^\circ\text{C}$ $R = 3,75$ см; $0,41 < \dot{\gamma} < 205$	[113]
Смесь масло-вода	Вискозиметр с трубкой	11.13	$\eta(\phi, X)$		
Апельсиновый сок	Haake RV12	11.8	$\tau(\dot{\gamma})$	Содержание мякоти: 2-12%, $T = -5^\circ\text{C}$	[107]
Пектины, цитрусовые	Вискозиметр с параллельными цилиндрами	Упруго-пластичные свойства	$\tau(\dot{\gamma}), G, J^*$	Пектин = 0,42% Сахароза = 60% $T = 20^\circ\text{C}$ ; $R_1 = 8-15$ мм $R_2 = 11-18$ мм; $h_0 = 10-30$ мм	

Таблица 11.16 (Окончание)

Пищевой продукт	Измерительный прибор	Используемые формулы	Измеряемые параметры	Диапазоны измерения	Литература
Пектины/фруктоза	Реометр Carr-Med	Динамический тест	$\eta^*, G', G''$	Пектин = 0,5–1,0% Фруктоза = 60% $f = 2^\circ$ ; $R = 2$ см; $T = 10-50^\circ\text{C}$	[44]
Картофельный крахмал	Коаксиальные цилиндры	11.13 модифиц.	$\eta(\tau), \tau_y$		
Крахмальная суспензия	Couette	11.8, 11.13	$\eta, G', G''$	$v = 0,002-2,5$ Гц; $T = 6$ $f = 2^\circ$ ; $X = 1-10$ (wt%)	
Обезжиренное молоко	Капиллярный вискозиметр	11.8	$\mu(X, T)$	$X = 0-15$ (wt%) $T = 10-50^\circ\text{C}$	[51]
Концентрированный томатный сок	Коаксиальные цилиндры	11.8	$\eta(X, T), \alpha(\dot{\gamma})$	$R_1 = 38$ мм; $h_c = 150$ мм зазор = 0,25–2,0 мм $X = 5,8-30$ (wt%); $T = 32-82^\circ\text{C}$	[38]
Томатная паста	Haake RV2 Carr-Med	11.8, 11.14 Динамический тест	$\alpha(\dot{\gamma}), \eta^*, G', G''$	$X = 25,5-34,4$ °B; $f = 2^\circ$ ; $R = 2$ см $v = 1-10$ Гц; $T = 40^\circ\text{C}$	[89]
Йогурт	Конусно-плоскостной Haake RV20	11.13	$\eta, \alpha(\dot{\gamma}), T = 10^\circ\text{C}$	Пектин = 0–0,5%	[84]



### 11.6.3 Текстура пищевых продуктов

В пищевых продуктах одним из основных показателей качества является текстура, которая связана с реакцией тактильных ощущений на физические раздражители, возникающие в результате контакта тех или иных частей человеческого организма (полости рта, пальцев и т. п.) с данным пищевым продуктом. Понятие текстуры определить довольно трудно, поскольку она связана с различными физическими ощущениями. В работе [13] дается следующее определение текстуры:

«Текстурные свойства пищевых продуктов являются набором физических характеристик, свойственных структурным компонентам данного продукта и производящим тактильное ощущение; эти свойства связаны с деформацией, дезинтеграцией и перемещением данного продукта под действием некоторой силы и объективно измеряются как функция массы, времени и расстояния».

Текстурные свойства тесно связаны с реологическими свойствами, однако реологические характеристики не охватывают всех факторов, определяющих текстуру пищевого продукта. В работе [111] способы измерения текстуры делятся на три группы: фундаментальные, эмпирические и имитационные. Фундаментальные способы определения текстуры представляют собой объективные методы измерения действительных реологических свойств пищевых продуктов, включая модуль Юнга  $E$ , модуль сдвига  $G$ , вязкость  $\mu$  и коэффициент Пуассона. Эти фундаментальные методы имеют то преимущество, что параметры хорошо определяются в известных единицах, а сами опыты могут быть воспроизводимы.

Применение эмпирических и имитационных методов (которые можно назвать «нефундаментальными»), ограничено конечным числом пищевых продуктов и дает данные, не подлежащие «конвертации», то есть их нельзя переносить на другие аналогичные продукты; вместе с тем эти данные возможно скоррелировать с органолептическими методами, они достаточно просты и широко распространены в пищевой промышленности.

### 11.6.4 Измерение текстуры при помощи «нефундаментальных» методов

К оборудованию для проведения подобных исследований относятся аппараты для моделирования тех или иных действий человека (например, разжевывания), и число таких аппаратов, судя по литературе, крайне ограничено. В частности, речь идет о дентурометре [81] и эмпирическом инструменте, прикладывающем последовательность или сочетание нагрузок и анализирующем реакцию данного пищевого продукта. К наиболее типичным приборам, применяющимся для эмпирического анализа (где невозможен скрупулезный научный подход) текстуры пищевых продуктов, относятся приборы, измеряющие силы и расстояния. Некоторые подобные инструменты приведены в табл. 11.17. Следует отметить, что в некоторых случаях можно применять унифицированные текстуроизмерительные системы (например, *Instron Universal Testing Machine* или *Kramer Shear Press*), способные выполнять несколько эмпирических и имитационных тестов на различных образцах (более подробную информацию о таких приборах можно получить у фирм-изготовителей).

Таблица 11.17. Классификация основных «нефундаментальных» средств измерения текстуры пищевых продуктов

Способ действия	Основной принцип	Прибор и фирма-изготовитель	Пример применения
Прокол и проникновение внутрь	Измеряется сила, требуемая для проникновения в образец и вызывающая в нем необратимые изменения структуры (точка выхода); было обнаружено, что она пропорциональна площади и периметру образца	Измеритель давления Magness-Taylor, D. Ballauf Co., 619 H Street N.W. Washington, D.C. US Bloom Gelometer G.C.A. Precision Scientific Group, 3737 W. Cortland St./, Chicago IL., 60647 US	Анализ фруктов и овощей, сливочного масла, маргарина, твердых жиров, мясных продуктов
Сдвиг	Измеряется сила, необходимая для осуществления сдвига в данном продукте, с применением одного или нескольких лезвий; или силы, необходимой для экструзии продукта через отверстия с заданными формой и размерами; в результате получается сложное сочетание нагрузок (напряжений), которое невозможно выразить в терминах модуля сдвига	Kramer Shear Cell Food Technology Co., 12300 Parklawn Drive Rockville, MD, 20852, US Instron Universal Testing Machine, Instron Corporation 2500, Washington St. Canton, MA 02021, US O.T.M.S. Cannery Machinery Ltd., PO Box 190, Sumco, Ontario, N3Y 4L1, Canada	Анализ фруктов и овощей, сыра, мясных продуктов и выпечных изделий
Измерение расхода	Измеряется время, необходимое для истечения пищевого продукта из резервуара с известными габаритами	Adams Consistometer, National Manufacturing Co., PO Box 30226, Lincoln, NE 68503 US Bostwick Consistometer, Central Scientific Co., 2600 South Kostner Ave, Chicago, IL, 60623 US	Переработанные фрукты и овощи (пюре, кетчуп, и т. п.); желе, сливки
Смесительное устройство	Измеряется момент вращения в результате смешения различных паст	Фаринограф C.W.Brabender Instruments, 50E Wesley St., South Hackensack, N.J. 07606, US	Мука, тесто

# Список обозначений

$b$	параметр уравнения 11.15
$Bx$	концентрация растворенных веществ, °Брикса
$c_p$	удельная теплоемкость при постоянном давлении, кДж/(кг · °С) или ккал/(кг · °С)
$E$	модуль Юнга, Па
$\Delta E_h$	энергия активации потока, Дж/кмоль <sup>-1</sup>
$f$	коэффициент уравнения 11.4
$g$	ускорение свободного падения, м/с <sup>2</sup>
$G$	модуль сдвига, Па/рад
$G''$	модуль сдвига при потерях, Па/рад
$G'$	модуль сдвига при хранении, Па/рад
$G^*$	комплексный модуль сдвига, Па/рад
$g_c$	коэффициент перевода, 9,81 Н/кг <sub>f</sub>
$G_T$	момент вращения, Н · м
$H$	энтальпия, Дж/кг
$J'$	ползучесть при хранении
$J''$	ползучесть вследствие потерь
$J^*$	комплексная ползучесть
$J_0$	мгновенная ползучесть
$J_R$	задержанная ползучесть
$J_M$	средняя ползучесть
$J_N$	ползучесть по Ньютону
$K$	модуль объемной упругости, Па
$k$	коэффициент сохранения формы, Па · с <sup>n</sup>
$k$	теплопроводность, Вт/(м · К)
$M$	молекулярный вес, г/моль, и содержание влаги на влажное вещество, г/100 г ВВ
$n$	индекс поведения потока, безразмерная величина
$N$	количество компонентов в композитном материале
$p$	отношение теплопроводности $k_d/k_c$
$q$	тепловой поток, Вт/м <sup>2</sup>
$r$	радиальное расстояние от линейной оси источника тепла, м
$R$	газовая постоянная, Дж/(К · моль)
$R_i$	радиус, м
$t$	время, с
$T$	температура, °С или К
$V$	объем, м <sup>3</sup>
$w$	массовая доля, %
$W$	масса, г или кг
$x$	мольная доля, %
$X$	содержание влаги на сухое вещество, г/г СВ, или концентрация, %
$Y_w$	доля воды на влажное вещество, М/100
$z$	расстояние, м

## Значения индексов

<i>c</i>	непрерывная фаза
<i>d</i>	дисперсная фаза или сухой
<i>eff</i>	эффективный
<i>eq</i>	равновесие
<i>f</i>	температура замерзания
<i>g</i>	газообразная фаза
<i>h</i>	лед
<i>i</i>	компонент смеси или композита
<i>0</i>	начальное состояние
<i>r</i>	относительный
<i>red</i>	сокращенный
<i>s</i>	образец, проба
<i>sp</i>	удельный, специфический
<i>w</i>	вода, водный

## Значения греческих символов

$\alpha$	температуропроводность, $\text{м}^2/\text{с}$
$\beta$	интегрирующая переменная уравнения 11.17
$\gamma$	деформация, $\text{с}^{-1}$
$\dot{\gamma}$	скорость сдвига, $\text{с}^{-1}$
$\gamma^*$	комплексный сдвиг, $^{-1}$
$\varepsilon$	линейная деформация
$\eta_{app}$	кажущаяся вязкость, $\text{Па} \cdot \text{с}^n$
$\eta''$	упругий компонент динамической вязкости, $\text{Па} \cdot \text{с}$
$\eta'$	вязкий компонент динамической вязкости, $\text{Па} \cdot \text{с}$
$\eta^*$	комплексная динамическая вязкость, $\text{Па} \cdot \text{с}$
$\lambda$	удельная теплоемкость воды, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$
$\mu$	коэффициент Пуассона
$\mu$	вязкость, $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$
$\sigma$	нормальное напряжение (нагрузка), $\text{Па}$
$\sigma$	напряжение (нагрузка), $\text{Па}$
$\tau$	напряжение сдвига (касательное напряжение), $\text{Па}$
$\dot{\tau}$	скорость изменения напряжения сдвига, $\text{Па}/\text{с}$
$\tau^*$	комплексное напряжение сдвига, $\text{Па}$
$\tau_y$	предел текучести
$\nu$	кинематическая вязкость (стоксы)
$\phi$	объемная доля
$\chi$	угол конуса вискозиметра, рад
$\omega$	динамическая частота, рад/с
$\Omega$	угловая скорость, рад/с
$[\mu]$	внутренняя вязкость
$\rho$	плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$

# Литература

1. Alagusundaram, K., Jayas, D. S., Muir, W. E., and White, N. D. G. Thermal conductivity of bulk barley, lentils and peas // *Trans. ASAE*. — 1991. — Vol. 34. — № 6. — P. 1784–1788.
2. Alvarado, J. D. and Romero, C. H. Physical properties of fruits. I, II, Density and viscosity of juices as functions of soluble solids content and temperature // *Lat. Am. App. Res.* — 1989. — № 19. — P. 15–21.
3. Andrieu, J., Gonnet, E., and Laurent, M. Pulse method applied to foodstuffs: thermal diffusivity determinations // *Food Engineering and Procedural Applications*. — Vol. 1, Transport Phenomena / Le Maguer and Jelen (eds.). — London, U. K.: Elsevier App. Sci., 1986. — P. 103–122.
4. Andrieu, J., Gonnet, E., and Laurent, M. Intrinsic thermal conductivities of basic food components // *High Temp. High Press.* — 1987. — № 19. — P. 323–330.
5. Andrieu, J., Gonnet, E., and Laurent, M. Thermal conductivity and diffusivity of extruded Durum Wheat Pasta // *Lebensm.-Wiss. u. -Technol.* — 1989. — № 22. — P. 6–10.
6. Bayindirli, L. Mathematical analysis of variation of density and viscosity of apple uice with temperature and cocncentration // *J. Food Proc. Precc.* — 1992. — № 16. — P. 23–28.
7. Bayindirli, L. and Oazsan, O. Modeling the thermophysical properties of sour cherry juice // *GIDA*. — 1992. — № 17(6). — P. 405–407.
8. Bazan, H. C. and Mascheroni, R. H. Transferencia de calor con simultaneo cambio de fase en la congelacion de carnes ovinas // *Rev. Lat. Transf. Cal. Mat.* — 1984. — № 8. — P. 55–76.
9. Behrens, E. Thermal conductivities of composite materials // *J. Comp. Mater.* — 1968. — № 2(Jan). — P. 2. — № 2(Oct). — P. 521.
10. Bird, R. B., Stewart, W. E., and Lightfoot, E. N. *Transport Phenomena*. — NY: Wiley, 1968.
11. Bistany, K. L. and Kokini, J. L. Dynamic viscoelastic propetries of foods in texture control // *J. Rheol.* — 1983. — № 27. — P. 605–620.
12. Bistany, K. L. and Kokini, J. L. Comparison of steady shear rheological properties and small amplitudine dynamic viscoelastic properties of fluid food materials // *J. Texture Studies*. — 1983. — № 14. — P. 113–124.
13. Bourne, M. C. *Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement*. — NY: Academic Press, 1982.
14. Brennan, J. G. Food texture measurement // *Developments in Food Analysis Technique-2* / King, R. D. (ed.). — London: Applied Science Publishers, 1980. — P. 56–63.
15. Califano, A. N. and Calvelo, A. Thermal conductivity of potato between 50 and 100 °C // *J. Food Sci.* — 1991. — № 56(2). — P. 586–587, 589.
16. Casada, M. E. and Walton, L. R. New model for determining thermal diffusivity with the thermal probe // *ASAE*. — 1989. — № 32(3). — P. 973–976.
17. Casson, N. A flow equation for pigment-oil suspensions of the printing ink type // *Rheology of Disperse Systems* / Mill, C. C. (ed.). — NY: Pergamon Press, 1959. — P. 82–104.
18. Choi, Y. and Okos, M. R. The thermal properties of tomato juice concentrates // *Trans. ASAE*. — 1983. — Vol. 26. — P. 305–311.
19. Choi, Y. and Okos, M. R. Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods // *Food Engineering and Process Applications*. — Vol. 1, Transport Phenomena / Maguer, M. Le and Jelen, P. (eds.). — London: Elsevier, 1986. — P. 93–101.
20. Christenson, M. E., Tong, C. H., and Lund, D. B. Physical properties of baked products as functions of moisture and temperature // *J. Food Proc. Preserv.* — 1989. — № 13. — P. 201–217.
21. Constenla, D. M., Lozano, J. E., and Crapiste, G. H. Thermophysical properties of clarified apple juice as a function of concentration and temperature // *J. Food Sci.* — 1989. — № 54. — P. 663–668.
22. Couette, M. M. Ettudes sur le frottement des liquides // *Ann. Chim. Phys.* — 1890. — № 21. — P. 433–510.
23. Cuevas, R. and Cheryan, M. Thermal conductivity of liquid foods — a review // *J. Food Proc. Eng.* — 1978. — № 2. — P. 283–306.

24. Dealy, J. M. *Theometers for Molten Polymers*. — NY: Van Nostrand Reinhold, 1982.
25. DeMan, J. M., Voisey, P. W., Rasper, V. F., and Stanley, D. W. *Theology and Texture in Food Quality*. — Westport, Connecticut: AVI Publishing, 1976.
26. Dickerson, Jr., R. W. *Thermal properties of foods // The Freezing Preservation of Foods*. — Vol. 2. — 4th ed. — AVI Publishing, 1968. — Ch. 2.
27. Doublier, J. L., Caunay, B., and Cuvelier, G. *Viscolastic properties of food gels // Viscolastic Properties of Foods / Rao, M. A. and Steffe, J. F. (eds.)*. — London, U. K.: Elsevier Applied Science, 1992.
28. Elustondo, M. and Urbicain, M. J. *Modified design of the thermal probe to measure thermal conductivities of foods*. — 1993. — (Неопубл.).
29. Eucken, A. *Forsch. Gebiete Ingenieur*. — Ausgabe A. — 1940. — 19. — 1. — 6.
30. Fernandez-Martin, F. and Montes, F. *Influence of temperature and composition on some physical properties of milk and milk concentrates. III, Thermal conductivity // Milchwissenschaft*. — 1972. — № 27(12). — P. 772–776.
31. Fernandez-Martin, F. and Montes, F. *Thermal conductivity of creams // J. Dairy Res.* — 1977. — № 44. — P. 103–109.
32. Figoni, P. I. and Shoemaker, C. F. *Review paper: characterization of structure breakdown of foods from their flow properties // J. Texture Studies*. — 1981. — № 12. — P. 287–305.
33. Fitch, D. L. *A new thermal conductivity apparatus // Am. Physics Teacher*. — 1935. — № 3(3). — P. 135–136.
34. Fredrickson, A. G. *Principles and Applications of Rheology*. — Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1964.
35. Gross, M. O., Rao, V. N. M., and Smit, C. J. B. *Rheological characterization of low methoxly pectin gel by normal creep and relaxation // J. Texture Studies*. — 1980. — № 11. — P. 27–29.
36. Hahn, S. J., Ree, T., and Eyring, H. *Flow mechanism of thixotropic substances // Ind. Eng. Chem.* — 1959. — № 51. — P. 856.
37. Harper, J. C. *Elements of Food Engineering*. — Davis, California: University of California, 1972.
38. Harper, J. U. C. and El Sahrigi, A. F. *Viscometric behavior of tomato concentrates // J. Food Sci.* — 1965. — № 30. — P. 470–476.
39. Hayashi, K., Nishikawa, T., and Vei, I. *Studies on thermal conductivity measurements of granular materials in systems of solid-fluid mixture // Yogyo-Kyokay Shi*. — 1974. — № 82. — P. 26.
40. Heldman, D. R. and Singh, R. P. *Food Process Engineering*. — Westport, CT: AVI Publishing, 1981.
41. Hooper, F. C. and Lepper, F. R. *Transient heat flow apparatus for the determination of thermal conductivities // ASHV Trans.* — 1950. — № 56. — P. 309–324.
42. Hsu, M.-H., Mannapperuma, J. D., and Singh, R. P. *Physical and thermal properties of pistachios // J. Agric. Eng. Res.* — 1991. — № 49. — P. 311–321.
43. Ibarz, A. and Sintes, J. *Rheology of egg yolk // J. Texture Stud.* — 1989. — № 20. — P. 161–167.
44. Janas, P. *Rheological studies on potato starch pastes at low concentrations // Starch/staerke*. — IV. — 1991. — № 43. — P. 172–175.
45. Johnson, J. F., Martin, J. R., and Porter, R. S. *Determination of viscosity of food systems // Theory, Determination and Control of Physical Properties of Food Materials / Rha, C. (ed.)*. — Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing, 1975. — P. 25–38.
46. Jowitt, R., Esehler, F., Kent, M., McKenna, R., and Roques, M. *Physical Properties of Foods, 1 and 2*. — [S. L.]: Elsevier Applied Science Publishers, 1983.
47. Keey, R. B. *Drying: Principles and Practice*. — NY: Pergamon Press, 1972.
48. Kent, M., Christiansen, K., van Hanehem, I. A., Holtz, E., Morley, M. J., Nesvadba, P., and Poulsen, K. P. *Cost 90 collaborative measurements of thermal properties of foods // J. Food Eng.* — 1984. — № 3. — P. 117–150.
49. Kokini, J. L. *Rheological properties of foods // Handbook of Food Engineering / Heldman, D. R. and Lund, D. B. (eds.)*. — NY: Marcel Dekker, 1992. — P. 1–39.
50. Krieger, I. M. *Rheology of emulsions and dispersions // Physical Properties of Foods / Peleg, M. and Bagley, E. B.* — Westport, CT: AVI Publishing, 1983.

51. Kubora, K., Matsumoto, T., Kurisu, S., Suzuki, K., and Hosaka, H. The equation regarding temperature and concentration of the density and viscosity of sugar, salt and skim milk solution // J. Fac. Appl. Biol. Sci. — 1980. — № 19. — P. 133–145.
52. Журнал «Холодильная техника». — 1976. — № 5. — С. 37.
53. Leider, P. J. and Bird, R. B. Squeezing flow between parallel disks. I. Theoretical analysis // Indust. Eng. Chem. Fund. — 1974. — № 13. — P. 336–341.
54. Lerchental, C. H. and Muller, H. G. Research in dough rheology at the Israel Institute of Technology // Cereal Sci. Today. — 1967. — № 12. — P. 190–192.
55. Levy, F. L. Calculating time-temperature and weight loss diagrams of chilling and freezing meats. Freezing, frozen storage and free drying of biological materials and foostuffs. — Paris: I. I. R., 1975. — P. 325–340.
56. Lewin, H. Plant handbook data — FE special report // Food Eng. — 1962. — March. — P. 89–99.
57. Lewis, T. and Nielsen, D. Dynamic mechanical properties of particulate-filled polymers // J. Appl. Polym. Sci. — 1970. — № 14. — P. 1449.
58. Lopes da Silva, J. A., Goncalve, M. P., and Rao, M. A. Rheological properties of high-methoxil pectin and locust bean gum solutions in steady shear // J. Food Sci. — 1992. — № 57. — P. 443.
59. Lozano, J. E., Urbicain, M. J., and Rotstein, E. Thermal conductivity of apples as a function of moisture content // J. Food Sci. — 1979. — № 14(1). — P. 198–199.
60. Lozano, J. E., Urbicain, M. J., and Rotstein, E. Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture content // J. Food Sci. — 1983. — № 48. — P. 1497–1502, 1553.
61. Marouilis, Z. B., Shah, K. K., and Saravacos, G. D. Thermal conductivity of gelatinized starches // J. Food Sci. — 1991. — № 56(3). — P. 773–776.
62. Mattea, M., Urbicain, M. J., and Rotstein, E. R. Prediction of thermal conductivity of vegetable foods by the effective medium theory // J. Food Sci. — 1986. — № 51(1). — P. 113–115, 134.
63. Mattea, M., Urbicain, M. J., and Rotstein, E. R. Effective thermal conductivity of cellular tissues during drying: prediction by a computer assisted model // J. Food Sci. — 1989. — № 54(1). — P. 194–197, 204.
64. Mattea, M., Urbicain, M. J., and Rotstein, E. R. Prediction of thermal conductivity of cellular tissues during dehydration by a computer model // Chem. Eng. Sci. — 1990. — № 45(11). — P. 3227–3232.
65. Maxwell, J. C. A Treatise on Electricity and Magnetism. — 3rd ed. — Oxford: The Clarendon Press, 1904. — Vol. 1. — P. 440.
66. Metzner, A. B. Rheology of suspensions in polymeric liquids // J. Rheol. — 1985. — № 29. — P. 739–744.
67. Miles, C. A., van Beek, G., and Veerkamp, C. H. Calculatin of thermophysical properties of foods // Physical Properties of Foods / Jowitt, R., Escher, F., Hallstrom, B., Meffert, H. F. Th., Spiess, W. E. L., and Vos, G. (eds.). — London: Applied Science, 1983. — P. 281.
68. Mills, P. and Kokini, J. L. Comparison of steady shear and dynamic viscoelastic properties of guar and karaya gums // J. Food Sci. — 1984. — № 49. — P. 1–4.
69. Mizrahi, S. and Berk, Z. Flow behaviour of concentrated orange juice: Mathematical Treatment // J. Texture Studies. — 1972. — № 3. — P. 68–79.
70. Mohsenin, N. Thermal Properties of Food and Agricultural Materials. — 2nd ed. — NY: Gordon and Breach Science Publishers, 1980.
71. Mooney, M. The viscosity of concentrated suspensions of spherical particles // J. Colloid Sci. — 1951. — № 6. — P. 162.
72. Murakami, E. G. and Okos, M. R. Predicting the thermal conductivity of dry porous foods. — 1986. — ASAE Paper No. 86–6538.
73. Nesvadba, P. Methods for the measurement of thermal conductivity and diffusivity of foodstuffs // J. Food Eng. — 1982. — № 1. — P. 93–113.
74. Nesvadba, P. A new transient method for the measurement of temperature dependent thermal diffusivity // J. Phys. D. Appl. Phys. — 1982. — № 15. — P. 725–738.
75. Nix, G. H., Lowery, G. W., Vachon, R. I., and Tanger, G. E. Direct determination of thermal diffusivity and conductivity with a refined line-source technique // Progress in Aeronautics and Astronautics. — Vol. 32 / Heuer, G. R. (ed.). — NY: Academic Press, 1967. — P. 865–878.

76. Nouredдини, H., Teoh, B. C., and Davis Clements, L. Densities of vegetable oils and fatty acids // JAOCS. — 1992. — № 69(12). — P. 1189–1191.
77. Nouredдини, H., Teoh, B. C., and Davis Clements, L. Densities of vegetable oils and fatty acids // JAOCS. — 1992. — № 69(12). — P. 1184–1188.
78. Peleg, M. Contact and fracture elements as components of the rheological memory of solids foods // J. Food Sci. — 1977. — № 44. — P. 277–281.
79. Perry, R. H. and Chilton, C. H. Chemical Engineers' Handbook. — 5th ed. — NY: McGraw-Hill, 1973.
80. Polley, S. L., Snyder, O. P., and Kotnour, P. A. Compilation of thermal properties of foods // Food Technol. — 1973. — Nov. — P. 76–94.
81. Proctor, B. E., Davison, S., Malecki, G. J., and Welch, M. A recording strain-gage denture tenderometer for foods. 1. Instrument evaluation and initial tests // Food Technol. — 1955. — № 9. — P. 471–479.
82. Progelhof, R. C., Throne, J. L., and Ruetsch, R. R. Methods for predicting the thermal conductivity of composite systems: a review // Polymer Eng. Sci. — 1976. — № 16(9). — P. 615–625.
83. Qui, C. G. and Rao, M. A. Role of pulp content and particle size in yield stress of apple sauce // J. Food Sci. — 1988. — № 53. — P. 1165–1170.
84. Ramaswamy, H. S. and Basak, S. Pectin and raspberry concentrate effects on the rheology of stirred commercial yogurt // J. Food Sci. — 1992. — № 57. — P. 357–360.
85. Ramaswamy, H. S. and Tung, M. A. Thermophysical properties of apples in relation to freezing // J. Food Sci. — 1981. — № 46. — P. 724–728.
86. Rao, M. A. Rheology of liquid foods // J. Texture Studies. — 1971. — № 8. — P. 135–168.
87. Rao, M. A. Measurement of flow properties of fluid foods. Developments, limitations, and interpretation of phenomena // J. Texture Stud. — 1978. — № 8. — P. 257–282.
88. Rao, M. A. Predicting the flow properties of food suspensions of plant origin // Food Technol. — 1987. — № 41. — P. 85–88.
89. Rao, M. A. and Cooley, H. J. Rheological behavior of tomato pastes in steady and dynamic shear // J. Texture Stud. — 1992. — № 23. — P. 415–425.
90. Rao, M. A., Cooley, H. J., and Vitali, A. A. Flow properties of concentrated juices at low temperatures // Food Technol. — 1984. — № 38. — P. 113–118.
91. Rao, M. A. and Steffe, J. F. Viscoelastic Properties of Foods. — London: Elsevier, 1992.
92. Rao, V. N. M. Viscoelastic properties of solid foods // Viscoelastic Properties of Foods / Rao, M. A. and Steffe, J. F. (eds.). — London, U. K.: Elsevier Applied Science, 1992.
93. Rha, Chokyun. Thermal properties of food materials // Chemie Microbiologie, 1975.
94. Rice, P., Selman, J. D., and Abdul-Rezzak, R. K. Effect of temperatures on thermal properties of 'record' potatoes // Int. J. Food Sci. Tech. — 1988. — № 23. — P. 281–286.
95. Riedel, L. Chemie mikrobiologie technologie der lebensmittel // Chemie Microbiologie. — 1978. — № 5(5). — P. 129–133.
96. Rivero, S. Conductividad Termica de Concentrados de Jugo de Tomates: M. Sc. Thesis. — Argentina: Universidad Nacinal del Sur, 1982.
97. Ross-Murphy, S. B. Rheological methods // Biophysical Methods in Food Research. — London: Blackwell Scientific, 1984.
98. Sanz, P. D., Alonso, M. D., and Mascheroni, R. H. Thermophysical properties of meat products: general bibliography and experimental values // ASAE. — 1987. — № 30(1). — P. 283–289, 296.
99. Sanz, P. D., Alonso, M. D., and Mascheroni, R. H. Equations for the prediction of thermophysical properties of meat products // Latin Am. Appl. — 1989. — № 19. — P. 155–163.
100. Seibel, E. Specific heats of various products // Ice and Refrigeration. — 1892. — № 2. — P. 256–257.
101. Shafiur Rahman, Md. Thermal conductivity of four food materials as a single function of porosity and water content // J. Food Eng. — 1992. — № 25. — P. 261–268.



102. Shama, F. and Sherman, P. The texture of ice-cream. 2. Rheological properties of frozen ice-cream // J. Food Sci. — 1966. — № 31. — P. 699–706.
103. Sherman, P. Industrial Rheology with Particular Reference to Foods, Pharmaceuticals, and Cosmetics. — NY: Academic Press, 1970.
104. Sherman, P. Food Texture and Rheology. — NY: Academic Press, 1979.
105. Shoemaker, C. F. and Figoni, P. I. Time-dependent rheological behavior of foods // Food Technol. — 1984. — № 38. — P. 110–112.
106. Slattery, J. C. Analysis of the cone-plate viscometer // J. Colloid Sc. — 1961. — № 16. — P. 431–437.
107. Suzuki, K., Maeda, T., Matsuoka, K., and Kubota, K. Effect of constituent concentration on rheological properties of corn oil-in-water emulsion // J. Food Sci. — 1991. — № 56. — P. 796–798.
108. Sweat, V. E. Experimental values of thermal conductivity of selected fruits and vegetables // J. Food Sci. — 1974. — № 39. — P. 1080–1083.
109. Sweat, V. E. Modelling the thermal conductivity of meats // Trans. ASAE. — Vol. 18. — № 3. — P. 564–568.
110. Sweat, V. E. and Parmelee. Measurement of thermal conductivity of dairy products and margerines // J. Food Process Eng. — 1978. — № 2. — P. 187.
111. Szeszaniak, A. S. Classification of textural characteristics // J. Food Sci. — 1963. — № 28. — P. 385–389.
112. Szeszaniak, A. S. Physical properties of foods: What they are and their relation to other food properties // Physical Properties of Foods / M. and Bagley, E. B. (eds.). — Westport, CT: AVI Publishing, 1983. — P. 16.
113. Tiu, C. and Boger, D. V. Complete rheological characterization of time-dependent food products // J. Texture Stud. — 1974. — № 5. — P. 329–338.
114. Urbicain, M. J. and Elustondo, M. P. Conductividad termica de alimentos: metodo del sensor. Simposio Nacional Sobre Tecnologia de Carne Bovina. — Argentina: Bahia Blanca, Dec. 1975.
115. Utracki, L. A. Temperature dependence of liquid viscosity // J. Macromol. Sci.-Phys. — 1974. — № 3. — P. 477–505.
116. Van Waser, J. R., Lyons, J. W., Kim, K. Y., and Colwell, R. E. Viscosity and Flow Measurement. — NY: Interscience, 1963.
117. Verma, L. S., Shrotriya, A. K., Singh, R., and Singh, U. An alternative approach for the thermal diffusivity calculation by parallel wire method // Nat. Acad. Sci. Lett. (India). — 1990. — № 13(8). — P. 321–323.
118. Vocadlo, J. J. and Young, M. Rheological properties of some commercially available fats // Can. Inst. Food Technol. J. — 1969. — № 2. — P. 137–140.
119. Voisey, P. W. and deMan, J. M. Application of instruments for measuring food texture // Rheology and Texture in Food Quality. — Westport, CT: AVI Publishing, 1976.
120. Wallapapan, K., Sweat, V. E., Diehl, K. C., and Engler, C. R. Thermal properties of porous foods. — ASAE Paper No. 83-6515. — 1983.
121. Wang, N. and Brennan, J. G. The influence of moisture content and temperature on the specific heat of potato measured by DSC // J. Food Eng. — 1993. — № 19. — P. 303–310.
122. Witte, L. C., Cheng, Y. T. E., and Cox, J. E. Thermophysical properties of foodstuffs. — ASME paper 76-HT-59. — 1976.
123. Woodams, E. E. and Nowrey, J. E. Literature values of thermal conductivities of foods // Food Technol. — 1968. — № 22(4). — P. 150–158.
124. Woodside, W. and Messmer, J. H. Thermal conductivity of porous media. 1. Unconsolidated sands // J. Appl. Phys. — 1961. — № 32(9). — P. 1688–1699.
125. Yamada, T. Thermal properties of potatoes // Nippon Nogei Kagaku, Kaishi. — 1970. — № 44. — P. 587–590.
126. Zuritz, C. A., Sastry, S. K., McCoy, S., Konanayakan, M., and Crawford, J. A revised theory for improvement of the Fitch method of thermal conductivity measurement. — ASAE Paper 97-6540, Winter meeting of the ASAE, Chicago, Dec. 15–18, 1987. — 1987.

# 12 СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ТЕСТА

*Леон Левин и Эд Бёмер*

*Перевод В. Ашкинази под ред. к. т. н., доцента Ишевского А. Л.*

## Содержание

- 12.1 Введение
  - 12.1.1 Что такое тесто?
  - 12.1.2 Виды теста
- 12.2 Виды тестомесильных машин
  - 12.2.1 Высокоскоростные тестомесильные машины
  - 12.2.2 Тестомесильные машины непрерывного действия
- 12.3 Технические вопросы конструирования и работы тестомесильных машин
  - 12.3.1 Баланс энергии тестомесильных машин
- Пример 12.1*
  - 12.3.2 Некоторые вопросы конструирования тестомесильных машин и масштабирования
  - 12.3.3 Управление замешиванием и его контроль
- 12.4 Основные сведения о раскатывании и слоении теста
  - 12.4.1 Тестовальцовочное оборудование
  - 12.4.2 Слоение теста
  - 12.4.3 Технические вопросы операций вальцевания теста
  - 12.4.4 Оценка производительности, давления, сил и мощности тестовальцовочных машин
  - 12.4.5 Конечная толщина теста
  - 12.4.6 Деформация валов и подшипников тестовальцовочных машин
  - 12.4.7 Вопросы масштабирования

Перечень обозначений

Литература

## 12.1 Введение

Обработка и транспортировка теста и подобных тесту материалов играет важную роль в пищевой промышленности, особенно в хлебопечении, изготовлении макаронных изделий, готовых к употреблению зерновых продуктов и закусок. К сожалению, в пищевой науке издано мало литературы по технологии производства и обработки теста, которая могла бы помочь инженеру-пищевiku в конструировании. Цель этой главы — дать вводный материал, который поможет понять некоторые основные принципы обработки теста.

### 12.1.1 Что такое тесто?

Формального определения теста не существует. Словарь просто определяет тесто как влажную массу, обычно состоящую из муки, воды и других ингредиентов. Это, в сущности, не дает нам рабочего описания теста. Те, кто работает с подобными материалами, дают определение вроде «Когда я вижу тесто, я знаю, что это тесто», но, если спросить их о различии между тестом и просто пастой, они легко различат их, заявив, что тесто более «твердое» и/или имеет вязкоупругие свойства. Мы не будем пытаться давать более подробное определение, но будем надеяться, что читатель также «узнает тесто, когда его увидит».

### 12.1.2 Виды теста

Инженер может встретить в пищевой промышленности несколько видов теста. Их можно разделить на три основных типа:

Тесто, которое в основном скреплено взаимодействием между белками теста и водой. В частности, мы имеем в виду тесто, структура и свойства которого определяются наличием особого вида белка, известного как *клейковина*. Термин *клейковина* обычно относится к белку пшеничной муки. Такое тесто с белковой структурой является основой для большинства хлебопекарных и макаронных изделий.

Тесто, которое в основном скреплено действием крахмала теста, требует, чтобы крахмал был в некоторой минимальной степени *гидролизован*. Примерами служат виды теста, встречаемые в производстве закусок и зерновых продуктов. Наиболее распространенным примером продуктов из такого теста являются закуски на основе кукурузы, такие как кукурузные и картофельные чипсы, сформованные из обезвоженного картофеля.

Третий тип теста часто имеет более высокое содержание жира и ограниченное содержание воды для гидратации (смачивания) исходных материалов. Ограниченное содержание воды препятствует формированию клейковины. Такое тесто по консистенции более похоже на замазку. Пекари часто описывают его как *песочное*. Наиболее широко такое тесто используют в производстве печенья и тортов.

Литература по пищевой науке и зерновым в основном посвящена первому типу теста на основе клейковины, и в этой главе преимущественно рассматривается именно такое тесто. Сначала необходимо дать определение широко применяемому термину *развитие теста*.

Развитие теста — это термин, который используют химики, изучающие зерновые культуры, и пекари для описания физических характеристик, наблюдаемых в тесте при замешивании, гидратировании молекул клейковины и их сцеплении. Развитие теста связано с превращением первоначально влажной липкой пасты из воды и муки в более тугую, менее клейкую, более вязкую массу. Пекари и химики, занятые зерновыми, обычно используют два других термина для описания физических характеристик теста, формируемых таким образом. Про тесто, которое становится очень тугим, вязким, иногда говорят, что оно *обладает повышенной упругостью*. Тесто, которое не становится очень тугим и вязким, называют *слабым*. Оптимальная консистенция для работы с тестом находится где-то между этими двумя крайностями. Оптимальный материал сопротивляется растяжению, имеет *память* (стремится вернуться в прежнее состояние после деформации) и может быть растянут в очень тонкие пленки без разрывов. Свойства пленки определяются составом теста, источником используемой пшеничной муки и степенью замешивания теста. Способность образовывать такие пленки — это уникальная способность теста из пшеничной муки. Именно это свойство позволяет тесту удерживать газ (подниматься) при образовании углекислого газа под действием дрожжей или химических разрыхлителей или при образовании водяного пара при выпечке. Дрожжи выделяют углекислый газ, ферментируя сахара в тесте, химические разрыхлители — за счет разложения кислых солей угольной кислоты.

Пекари и специалисты по химии зерновых [47] выделяют пять последовательных стадий *формирования* теста.

- *Составление смесей* — первая стадия *вымешивания*. Это короткий период времени, когда различные ингредиенты входят в контакт.
- *Соединение* — вторая стадия *вымешивания* теста. Представляют собой момент, когда все ингредиенты равномерно смешаны. В этой стадии тесто имеет вид клейкой малоэластичной или неэластичной пасты.
- Тесто, не прилипающее к стенкам тестомесильной машины — это третья стадия *вымешивания*. На этой стадии тесто начинает демонстрировать значительную вязкоупругость и его ингредиенты начинают полностью отрываться от боковых стенок тестомесильной машины.
- *Развитие* — четвертая стадия *вымешивания*. На этой стадии вязкость и эластичность теста продолжают возрастать, достигая максимального *развития* плотности, или видимой вязкости, а также максимальной или близкой к ней газодерживающей способности. Поэтому обычно достижение этой точки является целью *вымешивания* теста.
- *Обминка* — пятая стадия *вымешивания*. В этой стадии плотность теста, или видимая вязкость, начинает падать. Тесто становится менее эластичным, более клейким, его газодерживающая способность уменьшается. Обычно такое называют *избыточным развитием теста*. Считается, что это происходит в результате разрыва межмолекулярных дисульфидных связей, сформированных на предыдущих стадиях *вымешивания*.

Этот процесс можно наблюдать в промышленных тестомесильных машинах, но часто его изучают с помощью лабораторного прибора, *фаринографа* (C.W. Brabender

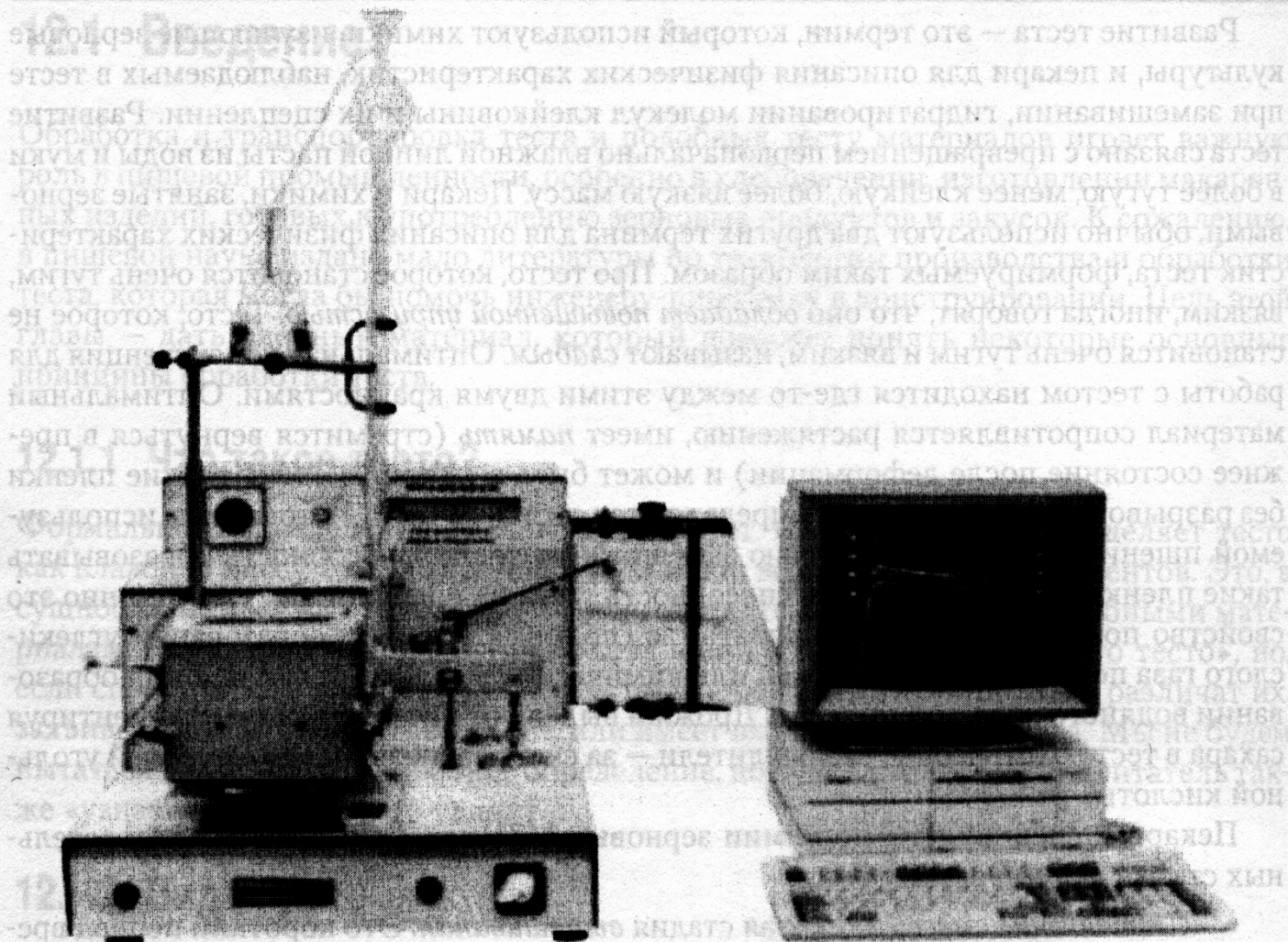


Рис. 12.1. Фаринограф (публикуется с разрешения C.W. Brabender, Lincoln, NE)

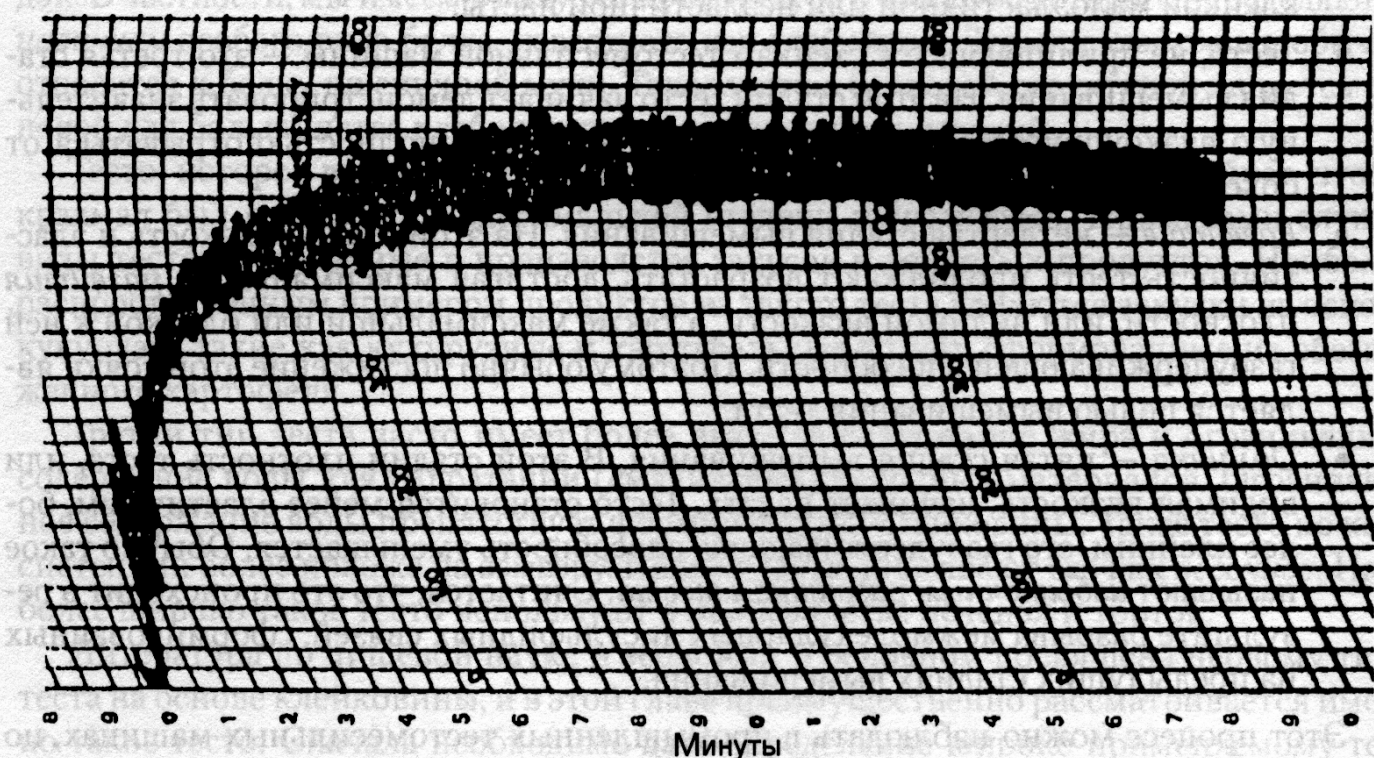


Рис. 12.2. Фаринограмма: единицы Брабендера — время





Рис. 12.3. Челнок для теста (публикуется с разрешения *The Hobart Co.*, Трой, ОН.)

Со., рис. 12.1), который представляет собой небольшую мешалку с двойными сигмовидными лопастями, применяемый для изучения процесса вымешивания и свойств разной муки. Прибор, описанный в работе [11], измеряет видимую вязкость, или плотность, записывая вращающий момент мешалки (в единицах Брабендера) в ходе вымешивания. Пример кривой, получаемой на фаринографе, приведен на рис. 12.2 [11]. Другой прибор, используемый для изучения явления развития, — это *миксограф* (*Mixograph, National Manufacturing Corp.*).

Возникает вопрос, как описать степень вымешивания, необходимую для развития теста? В производстве полимерных материалов (см. например, [34]), степень смешивания материалов с высокой вязкостью обычно оценивается приложением к ним нагрузки путем сдвига и растягивания. В литературе по зерновым степень смешивания обычно измеряют по общему количеству работы, затрачиваемой на смешивание материала. Задачей инженера (разработчика и/или производственника) является обеспечение наряду с правильным составом и температурой теста, необходимого объема затраченной работы на вымешивание теста или необходимой степени его развития.

## 12.2 Виды тестомесильных машин

Большинство тестомесилок представлены аппаратами периодического действия. Удобно разделить их на три группы: вертикальные, горизонтальные и высокоскоростные.

**Таблица 12.1. Емкость и мощность двигателя челночных тестомесилок компании Hobart**

Емкость (кварт)	Емкость (кг)	Мощность двигателя (кВт)
30	25	0,9
60	50	1,5
80	65	2,2
140	110	3,7

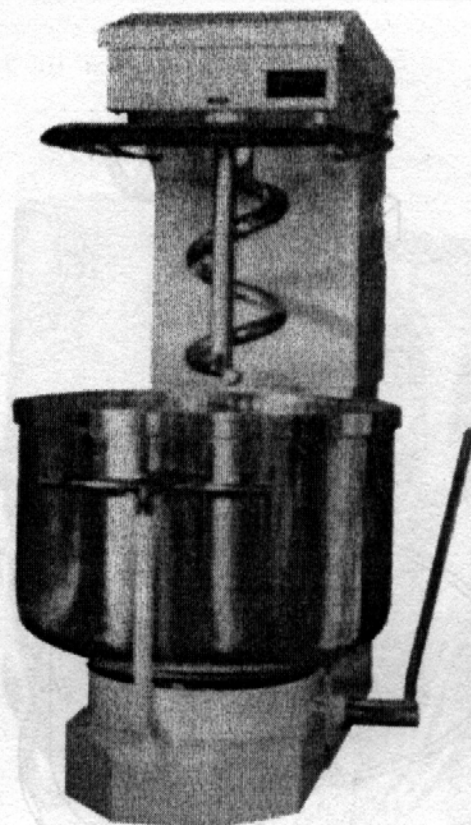
**Таблица 12.2. Емкость и мощность двигателя вертикальных тестомесилок с одной спиралью компании Rykaart**

Емкость (л)	Емкость (кг)	Мощность двигателя (кВт)
80	65	3,5
165	125	5,0
250	190	6,5
300	250	8,5
390	300	13,0

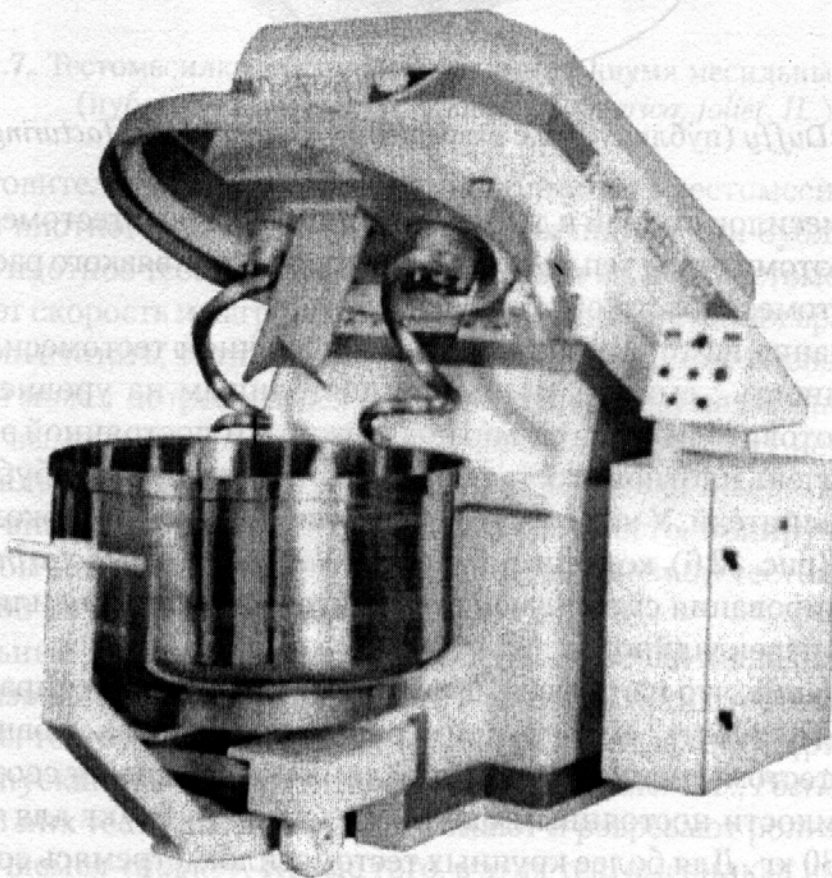
**Таблица 12.3. Емкость и мощность двигателя вертикальных тестомесилок с двумя спиралями компании VMI**

Емкость (л)	Емкость (кг)	Мощность двигателя (кВт)
100	48	3,7
170	80	6,0
220	120	9,0
280	180	11,7
400	250	14,6
550	360	22,4

Вертикальные тестомесилки, вероятно, наиболее знакомы читателю. Подобные устройства небольшого размера можно найти в хорошо оборудованной домашней кухне. Эти мешалки часто многофункциональны и имеют ограниченную емкость. Существует два основных типа: челночная/лопастная мешалка, выпускаемая *The Hobart Co.* и *AMF, Inc.* показанная на рис. 12.3, с максимальной емкостью примерно 110 кг теста. Тестомесилка спирального типа имеет вращающуюся дежу и один или два месильных органа. Выпускают такие мешалки фирмы *Rykaart Inc.*, *Rademacher Inc.*, *The Moline Co.*, *The Hobart Co.*, *CMC America Inc.* и *VMI, Inc.* (рис. 12.4 и 12.5). Емкость тестомесилки с одной спиралью ограничена примерно 300 кг, а конструкция с двумя спиралями может иметь емкость до 350 кг. В табл. 12.1 представлены типовые емкости и мощности двигателя для челночной тестомесилки [20]. В табл. 12.2 [51] и 12.3 [59] представлены типичные емкости и мощности двигателей для



**Рис. 12.4.** Тестомесилка с одной спиралью  
(публикуется с разрешения *Rykaart, Inc., Hamilton, OH.*)



**Рис. 12.5.** Тестомесилка с двумя спиральями  
(публикуется с разрешения *VMI, Inc., Cranberry, NJ.*)



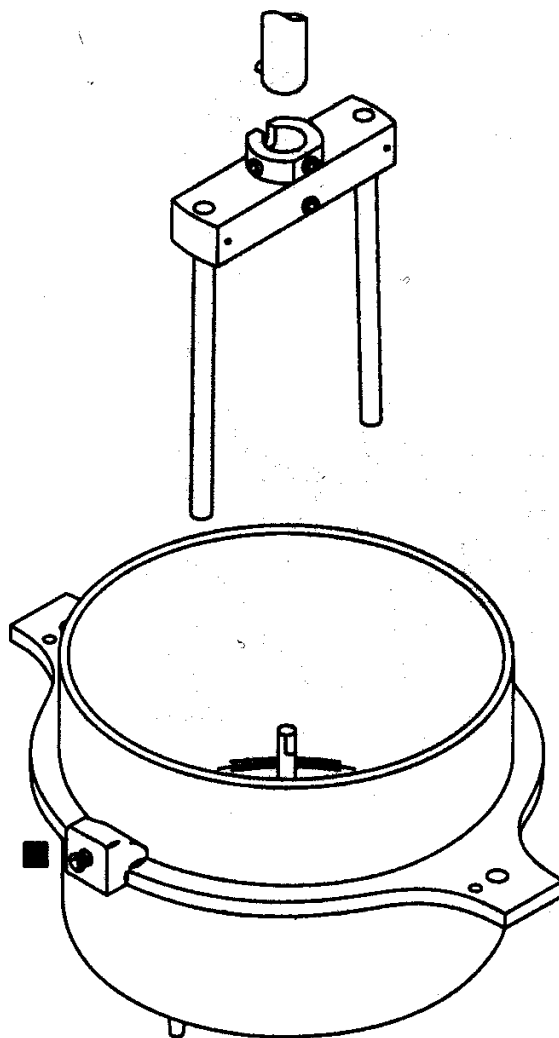


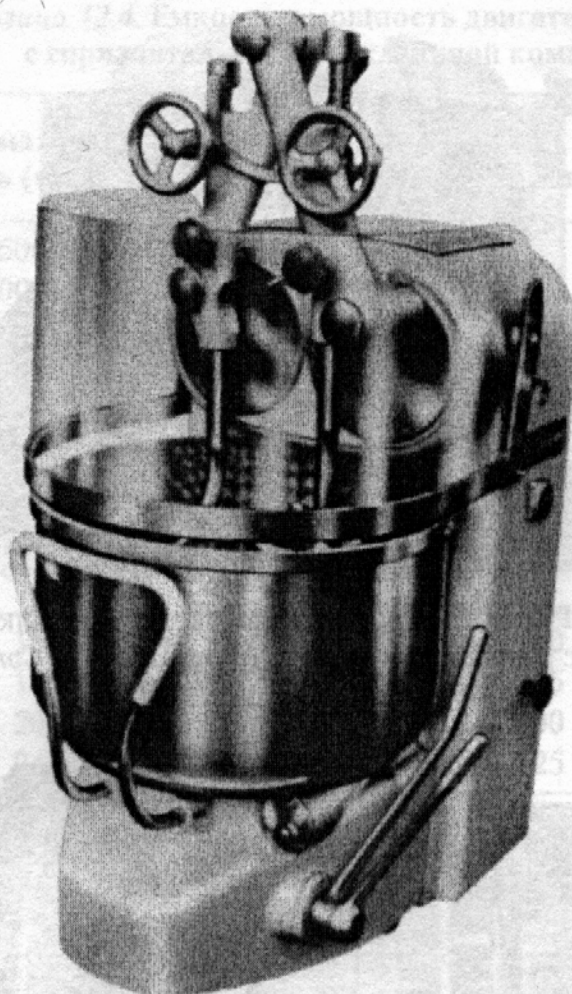
Рис. 12.6. Дежа McDuffy (публикуется с разрешения *National Manufacturing, Lincoln, NE.*)

спиральных тестомесилок с одной и двумя спиральями. Обычно тестомесилки не снабжают рубашкой, поэтому отвод тепла, образующегося за счет вязкого рассеивания, при использовании тестомесилок такого типа невозможен.

Обратите внимание на то, что изготовитель челночной тестомесилки сохраняет соотношение мощность : емкость примерно постоянным на уровне 0,035 кВт/кг. Очевидно, что изготовители сознательно поддерживают постоянной энергию на единицу массы. Для очень плотного теста (например, для пиццы или бубликов) имеются более мощные двигатели. У них соотношение мощность : емкость около 0,045 кВт/кг. Переходные дежи (рис. 12.6), которые поставляет *National Manufacturing Inc.*, предназначены для моделирования смешивающего действия миксографа или тестомесилки с горизонтальной перекладной.

Обратите внимание, что изготовитель тестомесилки с одной спиралью поддерживает соотношение мощность : емкость примерно постоянным на уровне 0,04 кВт/кг.

Изготовитель тестомесилок с двумя спиральями поддерживает соотношение мощности мотора к емкости постоянным около 0,075 кВт/кг для тестомесилок с емкостью ниже 180 кг. Для более крупных тестомесилок, стремясь сохранить постоянство энергии, приходящейся на единицу массы, это соотношение уменьшают примерно до 0,05 кВт/кг.



**Рис. 12.7.** Тестомесилка для пирожного теста с двумя месильными органами (публикуется с разрешения *СМC America, Joliet, IL.*)

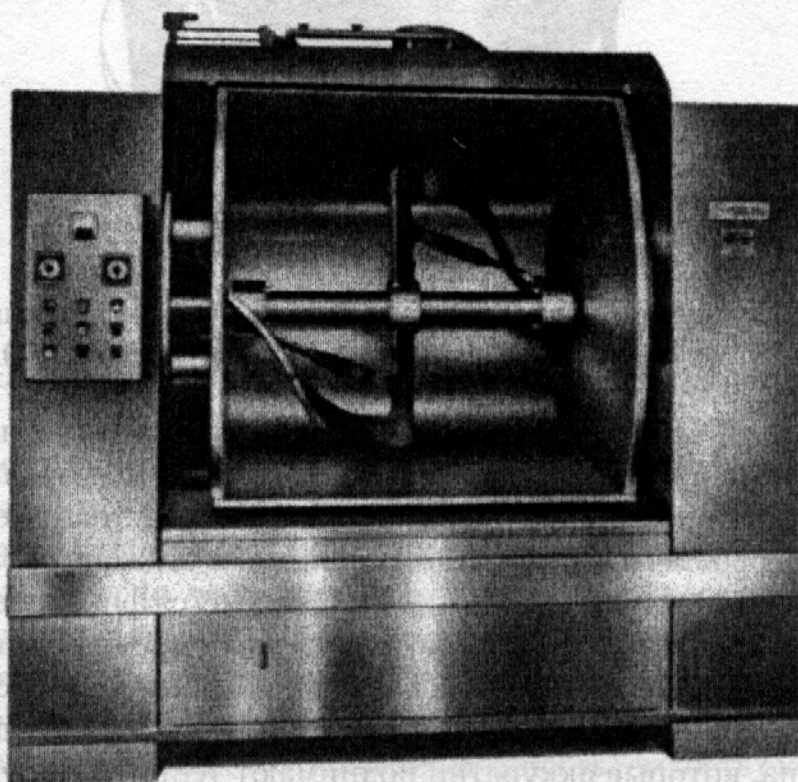
Один изготовитель [10] не рекомендует использовать тестомесилки с одной спиралью для очень плотного теста, применяемого для пиццы или бубликов, а другой [42] указывает, что плотное тесто может обрабатываться в таких тестомесилках. С этой целью уменьшают скорость и нагрузку тестомесилки для снижения вращающего момента на ее валах. Если считать, что для развития теста требуется фиксированная энергия, то в такой ситуации может потребоваться более длительное время замешивания.

Иногда для вымешивания теста для тортов и подобного ему используется специальная вертикальная тестомесилка. Такая тестомесилка имеет два клешневидных месильных органа, которые аккуратно поднимают тесто, копируя действие применяемых дома обычных вилок (рис. 12.7). Емкость подобной тестомесилки ограничена примерно 200 кг теста [7].

Горизонтальные тестомесилки, это, пожалуй, «рабочая лошадка» больших хлебопекарных производств. Существует несколько типов таких тестомесилок. Наиболее распространены тестомесилки с горизонтальной перекладной (рис. 12.8). Такие тестомесилки выпускают, в частности, компании *APV Baker Inc.*, *Peerless Machinery Inc.* и *Champion Inc.* В них тесто растягивают, сжимают и разрезают роликами, установленными на движущемся «пауке». Кроме того, в этих тестомесилках имеется стационарная перекладная, называемая монтровкой, которая снимает тесто с паука, мешая тесту двигаться единой массой, что позволяет роликам разминать постоянно обнов-



**Рис. 12.8.** Горизонтальная тестомесилка  
(публикуется с разрешения *Peerless Manufacturing Corp., Sydney, OH.*)



**Рис. 12.9.** Тестомесилка с одной спиралью  
(публикуется с разрешения *Peerless Manufacturing Corp., Sydney, OH.*)

ляемую порцию теста по стенке тестомесилки. Такие тестомесилки выпускаются разных размеров емкостью примерно до 3000 фунтов теста, они имеют рубашку для циркуляции хладагента, обычно могут работать на двух скоростях, имеют опрокидывающиеся дежи для облегчения выгрузки теста и могут быть полностью автоматизированы. Емкость и мощность тестомесилок двух компаний-изготовителей приведены в табл. 12.4 [3] и 12.5 [46]. Рассматриваемые тестомесилки обоих изготовителей обычно работают на скоростях 35 или 70 об/мин.

Таблица 12.4. Емкость и мощность двигателя тестомесилок с горизонтальной перекадиной компании *APV Baker*

Максимальная емкость (фунт)	Минимальная емкость (фунт)	Мощность двигателя (л. с.)
1600	800	60
2000	1000	75
2500	1000	100

Таблица 12.5. Емкость и мощность двигателя тестомесилок с горизонтальной перекадиной компании *Peerless*

Емкость (фунт)	Мощность двигателя (л. с.)
1300	60
1600	75
2000	100
2400	125

Таблица 12.6. Емкость и мощность двигателя сигма-месилок компании *Champion*

Емкость (фунт)	Мощность двигателя (л. с.)
500	5
750	7,5

Соотношение поступающей энергии к массе для обеих конструкций выдерживается примерно постоянным 0,04 л. с./фунт (0,065 кВт/кг) и 0,05 л. с./фунт (0,08 кВт/кг), соответственно, для разных размеров тестомесилок. Возможности приложения энергии значительно выше, чем у спиральных тестомесилок, несмотря на то что они работают на большой скорости. Это указывает на то, что месилки с горизонтальной перекадиной могут создавать значительно больший вращающий момент на единицу массы, и, видимо, работать с более широким диапазоном продуктов (с более плотным тестом) или способны быстрее формировать тесто.

Другой тип горизонтальной тестомесилки, который широко распространен, — спиральная тестомесилка с одним месильным органом, представленная на рис. 12.9. Такие тестомесилки часто используют при изготовлении песочного теста для печенья или других изделий, они выполняются опрокидывающимися для облегчения выгрузки теста и имеют рубашку для охлаждения. Они обычно работают на низких скоростях (около 25 об/мин). В табл. 12.6 [7] приведена информация изготовителя по этому типу тестомесилки.

Обратите внимание, что соотношение подводимой энергии к емкости таких машин около 0,01 л. с./фунт, что значительно меньше, чем для тестомесилок вертикаль-



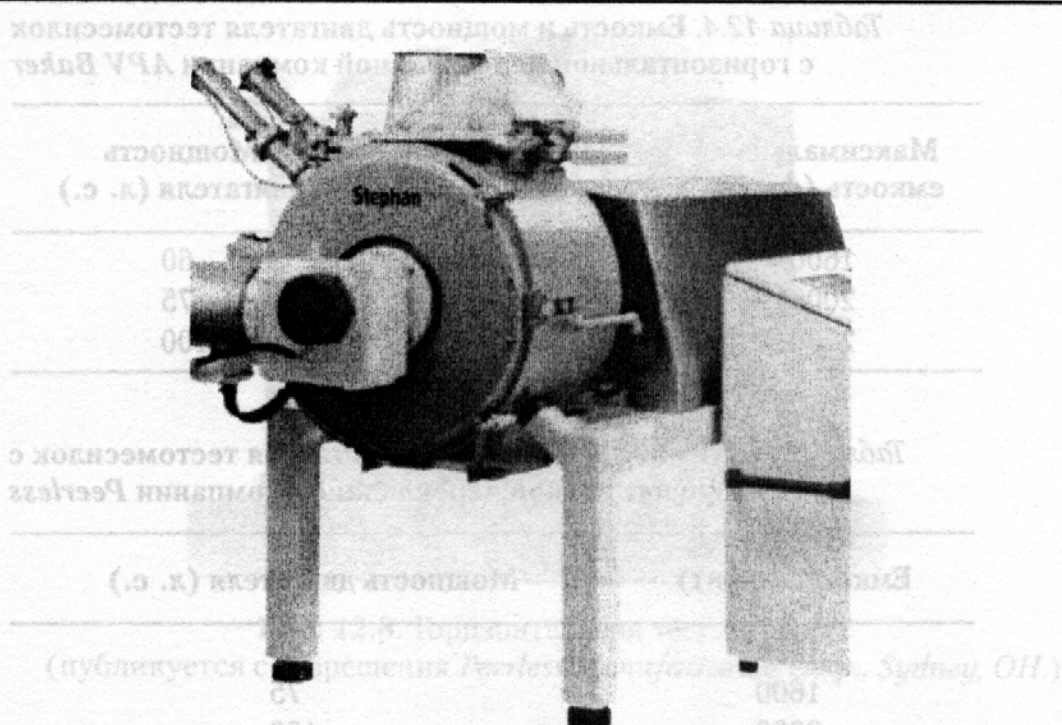


Рис. 12.10. Высокоскоростная тестомесилка  
(публикуется с разрешения *Stephan, Columbus, OH.*)

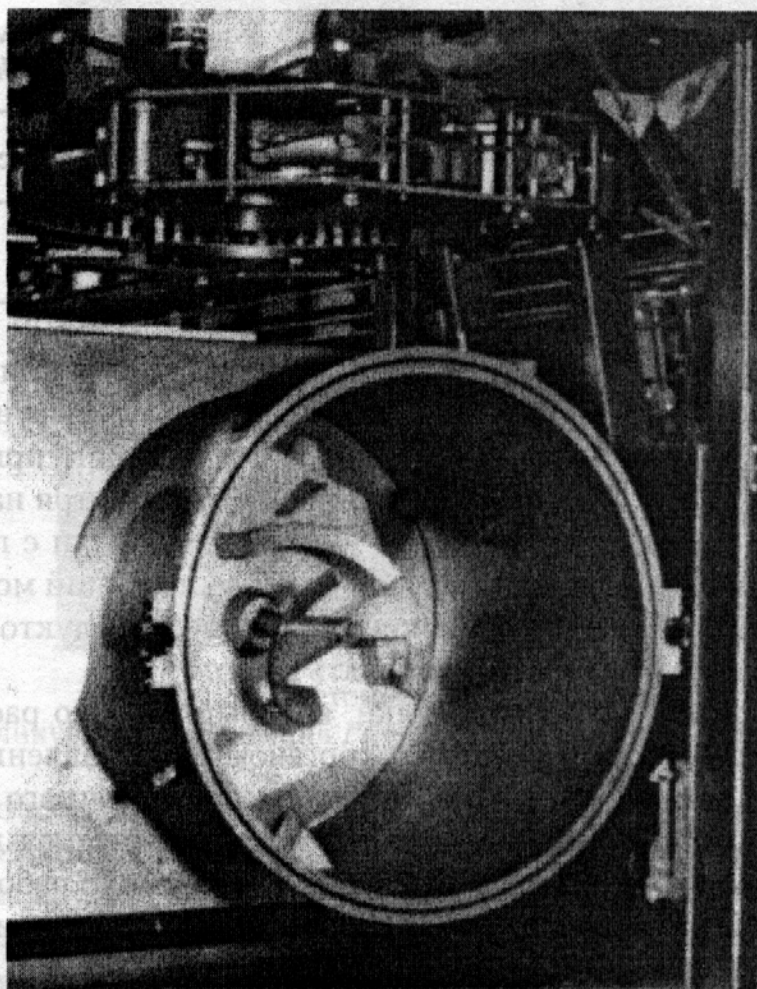


Рис. 12.11. Высокоскоростная тестомесилка *Tweedy*  
(публикуется с разрешения *APV Baker, Inc., Peterborough, England*)

Таблица 12.7 Характеристики тестомесилок *Tweedy*

Масса замеса, кг	Выход, кг/ч	Мощность мотора, кВт · ч
220	3000	55
275	3850	75
340	4700	90
385	5400	110

Таблица 12.8 Характеристики высокоскоростных мешалок компании *Rykaart*

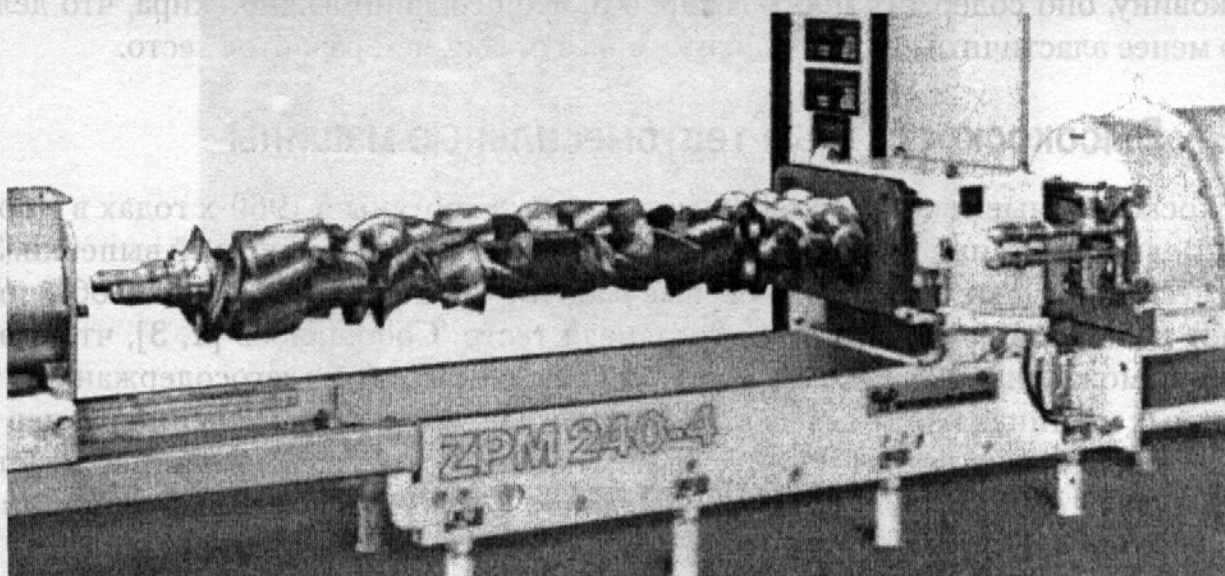
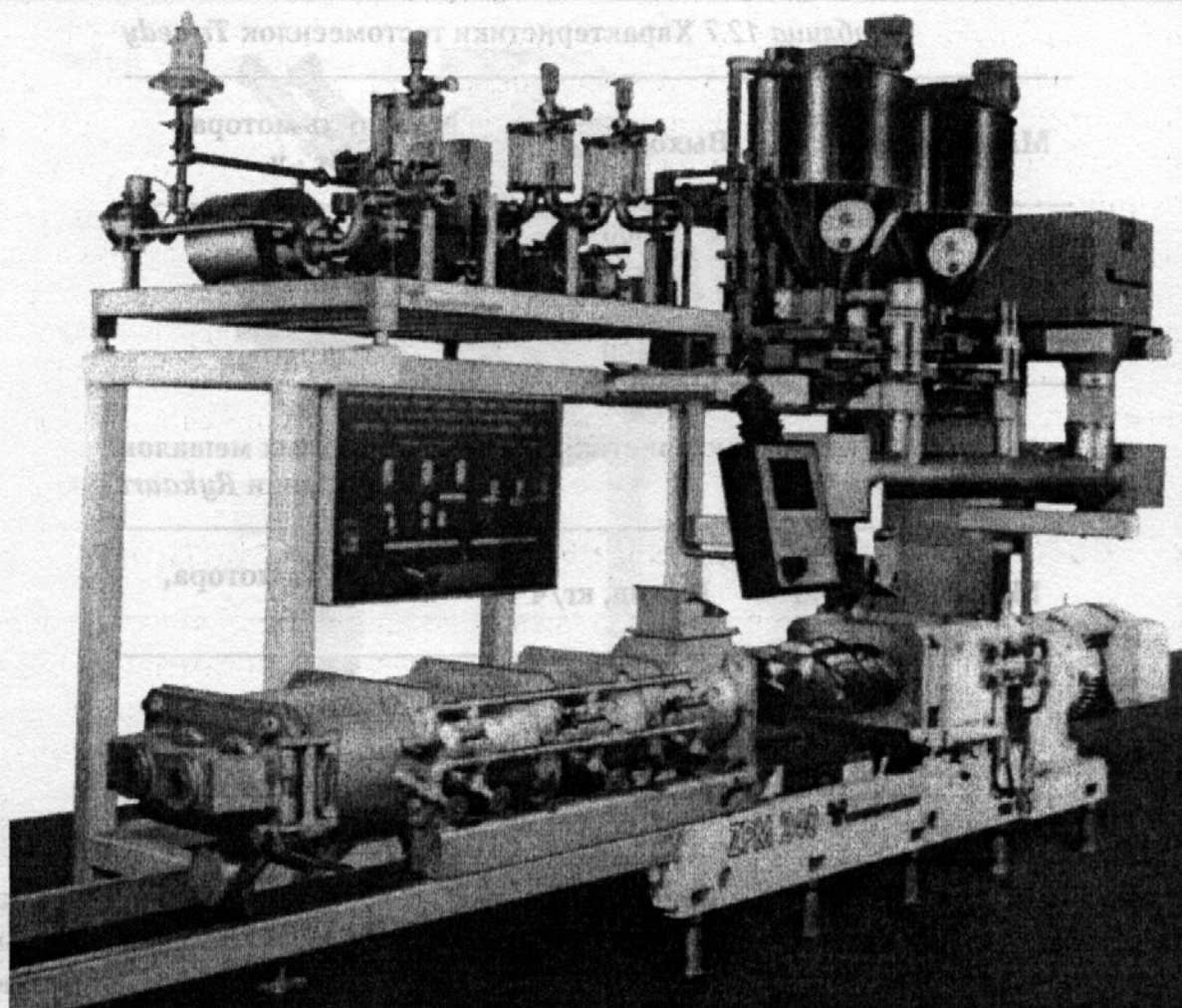
Масса замеса, кг	Выход, кг/ч	Мощность мотора, л. с.
80	1200	20
110	1800	30
160	2400	40

ных спиральных и с горизонтальной переключиной. Песочное тесто, обрабатываемое в таких тестомесилках, не обладает эластичностью теста на основе клейковины. Это объясняется тем, что в нем недостаточно воды и растворимых белков, образующих клейковину, оно содержит много сахаров и, что особенно важно, жира, что делает тесто менее эластичным и более похожим на замазку, чем развитое тесто.

## 12.2.1 Высокоскоростные тестомесильные машины

Высокоскоростные тестомесильные машины разработаны в 1960-х годах в Чорли-вуде (Великобритания) [3] для повышения эффективности операций выпечки. Эти тестомесилки имеют высокоскоростные рабочие органы (от 300 до 1200 об/мин) и делают небольшие замесы, быстро развивая тесто. Сообщалось [1, 3], что в этих агрегатах можно получать хорошее тесто при более высоких влагосодержаниях, чем в обычных машинах периодического действия, и что они дают меньший размер пор в поднявшемся продукте. Такие тестомесилки выпускает ряд компаний, в частности, *Tweedy (APV Baker, Inc.)*, *Stephan Machinery Corp.*, *Rykaart Inc.*, и *Peerless Machinery Corp.* На рис. 12.10 и 12.11 приведены примеры тестомесилок этого типа. Некоторые из них работают при частичном вакууме, что уменьшает количество и размер воздушных пузырьков в тесте, дает более однородные мелкие поры. Хотя высокоскоростные тестомесилки поставляются часто с охлаждающей рубашкой, время замеса столь мало, что трудно отвести через рубашку значительное количество теплоты.

В табл. 12.7 [2] и 12.8 [51] приведена информация изготовителей по тестомесильным машинам, которые могут использоваться как на хлебопекарном производстве значительной мощности, так и в более мелкой пекарне.



**Рис. 12.12.** Система непрерывного замешивания теста  
(публикуется с разрешения *Werner and Pfleiderer, Stuttgart, Germany*)

Обратите внимание, что общая энергия на единицу массы для тестомесилки *Tweedy* примерно постоянна и составляет  $19 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}$ . Изготовитель утверждает, что технологический процесс требует полезной энергии  $11 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}$ . Тестомесилка *Tweedy* делает 14 замесов в час при продолжительности замешивания каждого 3 минуты. Обра-



тите внимание, что величина, принятая за основу при конструировании ( $11 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}$ ) та же, что приведенная для Чорливудского процесса [21, 22]. Эта величина должна использоваться как ориентировочная. В ряде сообщений [21, 22, 40, 63, 64] утверждается, что требуемая энергия может в значительной степени отклоняться от обычно применяемой для Чорливудского процесса [54]. Фактическая энергия, необходимая для получения оптимального теста, является функцией состава пшеницы, которая зависит от разновидности пшеницы и условий выращивания. Сообщаемые значения фактически затраченной работы варьируются примерно от  $5 \text{ Вт} \cdot \text{час/кг}$  до  $20 \text{ Вт} \cdot \text{час/кг}$ .

Данные, приведенные в табл. 12.8, похоже рассчитаны на двигатель со входным расходом мощности в  $12 \text{ Вт} \cdot \text{час/кг}$ .

### 12.2.2 Тестомесильные машины непрерывного действия

Тестомесильные машины непрерывного действия не нашли широкого признания в США. В 1950-е годы было продано две системы непрерывного замешивания теста (компаний *AMF Inc.* и *J. C. Baker Inc.*). Эти системы описаны в литературе [12, 36], а их эффективность обсуждается в работе [6]. Поскольку изделия, получаемые при таком процессе, обычно имели очень мелкие поры, их сравнивали с пенопластом. Кроме того, возможности таких тестомесилок в основном ограничивались получением белого хлеба. Ни одна из этих систем сейчас не продается.

В последние годы непрерывное замешивание теста получило признание, особенно, в Европе. Такое оборудование производят, например, *Werner and Pfleiderer Corp.* (см. рис. 12.12), *Reimelt Inc.*, *Rykaart, Inc.*, и *Buss Inc.* В литературе о работе этого оборудования информации нет или очень мало. Системы компаний *Reimelt* и *Werner and Pfleiderer* основаны на применении двухшнекового экструдера. Система компании *Buss* — это специальный одношнековый экструдер, известный в производстве полимерных материалов как *Ko-Kneader* [62], а *Paramelt* (компания *Rykaart*) — непрерывное тестомесильное устройство, основанное на приложении энергии скоростных лопастей. В табл. 12.9 [61] приведены некоторые данные по замешиванию пшеничного теста с помощью системы корпорации *Werner and Pfleiderer*.

Сведения о производительности этих машин сильно расходятся. Например, *Werner and Pfleiderer* [61] приводят данные, что 120-миллиметровая машина может произвести  $700 \text{ кг/ч}$  пшеничного теста. Более низкие скорости и мощности более крупных тестомесильных систем являются, вероятно, отражением того, что в них площадь теплопереноса на единицу объема ниже, что делает регулирование температуры го-

Таблица 12. 9. Характеристики систем тестомесильных систем *Werner and Pfleiderer ZPM*

Диаметр шнека (мм)	Выход (кг/час)	Макс. мощность мотора (кВт)	Макс. скорость шнека (об/мин)
120	400	35	130
240	1500	80	100
320	2700	100	100



раздо более сложным. Как следствие, для более крупных машин необходима более низкая мощность и производительность на единицу объема тестомесилки.

## 12.3 Технические вопросы конструирования и работы тестомесильных машин

### 12.3.1 Баланс энергии тестомесильных машин

Один из принципиальных вопросов, который должен быть решен при конструировании систем замешивания теста, — это четкое решение энергетического баланса системы. Потребляемая энергетика определяется в соответствии с требованиями развития теста. Кроме того, другие требования к характеристикам теста определяют конечную температуру теста, выходящего из тестомесилки. При расчете теплового баланса необходимо учесть несколько факторов. Общий энергетический баланс представлен уравнением

$$\sum_{\text{ингредиентов}} M_i \cdot \Delta h_i = M_{\text{муки}} \cdot \Delta h_w + M \cdot E_m - Q_j. \quad (12.1)$$

В правой части этого уравнения имеется две составляющие тепла: положительное подводимое тепло, являющееся результатом механического действия, ориентировочно 10 Вт · ч/кг, и отрицательное тепло, отводимое через рубашку за счет теплопроводности и конвекции. Кроме того, имеется небольшое количество теплоты, которое может рассматриваться как подводимое тепло, — это тепло смачивания муки. Примерное значение тепла смачивания определяется формулой [47]:

$$\Delta h_w = 15,1 \text{ кДж/кг}. \quad (12.2)$$

Энтальпии (теплосодержания) входящих потоков определяются, исходя из физических свойств различных компонентов сырья. Следует помнить, что воду можно вводить (и часто вводят) в виде льда, чтобы воспользоваться возможностью дополнительного отвода тепла за счет таяния льда. Теплота плавления льда примерно 334 кДж/кг. Этот метод часто используют летом, чтобы решить проблему, связанную с получением из хранилищ теплой муки. Лед может также использоваться весь год для регулирования температуры очень вязкого теста. Тесто с высокой вязкостью ведет к высоким скоростям поступления энергии из-за вязкого рассеяния.

Для вычисления энтальпии (теплосодержания) разных компонентов можно использовать разные источники. Например, в работе [49] приводятся значения теплоемкости разных видов теста от 2,62 кДж/(кг · К) до 3,16 кДж/(кг · К), при среднем значении 2,88 кДж/(кг · К). Эти данные относятся к тесту, содержащему 42–46% влаги. В [47] приводится теплоемкость муки 1,76 кДж/(кг · К). В [41] (1980) даны несколько методов оценки теплоемкости пищевых продуктов и приводятся уравнения и графики теплоемкости пшеницы при различных значениях влажности и темпера-

Таблица 12.10 Теплоемкость компонентов теста

Температура, °С	Теплоемкость, кДж/(кг · К)				
	Вода	Белок	Жир	Углеводы	Зола
20	4,180	1,711	1,928	1,547	0,908
30	4,172	1,765	1,953	1,586	0,937
40	4,174	1,775	1,981	1,626	0,947

туры. Наиболее универсальные данные теплоемкости различных компонентов теста в зависимости от температуры представлены в работе [45]. Эти данные сведены воедино в табл. 12.10.

Значение теплоемкости смеси получают просто осреднением по массе значений теплоемкостей отдельных компонентов. Теплоемкость, приведенная для жира, предполагает, что плавления или кристаллизации жира не происходит. Теплота плавления твердых составляющих жира находится между 20 и 44 кал/г расплавленных твердых (сухих) веществ жира [14]. Строго говоря, энергия, связанная с плавлением твердой фракции жиров, должна также быть включена, но поскольку теплота плавления жировых компонентов незначительна, ее можно не учитывать.

Имеется мало данных по коэффициентам конвективной теплопередачи для замешивания подобных вязких материалов. В работе [56] приводятся суммарные коэффициенты теплопередачи для подобных смесителей пасты в диапазоне 225–450 Вт/(м<sup>2</sup> · К). В работе [47] максимальное значение для мешалок с горизонтальной перекладиной оценивается как 400 Вт/(м<sup>2</sup> · К). В работе [66] приводится значение 500 Вт/(м<sup>2</sup> · К) для двухшнековых экструдеров, которые подобны тестомесильным системам непрерывного действия *Werner and Pfleiderer*. Для одношнековых экструдеров в работе [33] приводятся значения 200–480 Вт/(м<sup>2</sup> · К), а в [17] — 225 Вт/(м<sup>2</sup> · К). Представляется вполне разумным принять это значение около 225 Вт/(м<sup>2</sup> · К).

### Пример 12.1

Применение данных, приведенных выше, вероятно лучше всего иллюстрирует следующая задача.

**Условие:** Предположим, что мука имеет следующий примерный состав, %:

Вода	14
Зола	1
Белок	12
Жир	1
Углеводы	72

На основе данных таблицы 12.10 теплоемкость оценивается как 1,93 кДж/(кг · F) (градус Фаренгейта). Тесто получают, используя 0,65 кг воды на 1 кг муки. Теплоемкость воды по табл. 12.10 примерно 4,18 кДж/(кг · C).

Предположим, что общая энергия, приложенная для развития теста, равна 10 Вт · ч/кг и что эта энергия подается в течение 12-минутного периода замешивания.

В тестомесилке помещается 700 кг, площадь рубашки равна 3,5 м<sup>2</sup>. Температура охладителя принимается равной –5°C, коэффициент теплопередачи равен 225 Вт/(м<sup>2</sup> · К).

Считая, что температура поступающих воды и муки 20°C, определим, какова будет конечная температура теста?

**Решение:** Тепловой баланс составляется следующим образом:

Сначала определим видимую начальную температуру смеси ингредиентов, поступающей в тестомесилку.

$$\sum_{\text{ингредиентов}} M_i \Delta h_i = M_{\text{муки}} \Delta h_{\text{ш}} \quad (12.3)$$

Вычисляем подводимую теплоту за счет замачивания

$$M_{\text{муки}} \Delta h_{\text{ш}} = 1,78 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (12.4)$$

Изменения энтальпии муки и воды определяем по формулам:

$$\Delta h_{\text{воды}} = C_{p_{\text{воды}}} \cdot (E - 20^\circ \text{C}), \quad (12.5)$$

$$\Delta h_{\text{муки}} = C_{p_{\text{муки}}} \cdot (E - 20^\circ \text{C}). \quad (12.6)$$

Комбинируя уравнения (12.3)–(12.6) можно определить температуру, получаемую после соединения ингредиентов. Это видимая начальная температура замешивания, равная примерно  $23,3^\circ \text{C}$ .

Теплота, отводимая рубашкой в процессе замешивания, определяется по формуле:

$$Q_j = \alpha A t \Delta T_{LM} \quad (12.7)$$

Баланс энтальпий для периода замешивания:

$$\sum_{\text{ингредиентов}} M_i \Delta h_i = M_{\text{муки}} \Delta h_{\text{ш}} + M E_{\text{т}} = Q_j \quad (12.8)$$

Комбинирование уравнений 12.5 и 12.6 с 12.7 и 12.8 дает уравнение для определения конечной температуры теста методом подбора. Расчетная конечная температура теста равна  $27,3^\circ \text{C}$ .

Сколько необходимо использовать льда для поддержания температуры теста ниже  $20^\circ \text{C}$ ? Тепловой баланс для смешивания ингредиентов вместе для получения начальной температуры замешивания равен:

$$\sum_{\text{ингредиентов}} M_i \Delta h_i = M_{\text{муки}} \Delta h_{\text{ш}} \quad (12.9)$$

Изменение энтальпии, обусловленное таянием льда, дает следующая формула:

$$\Delta h_{\text{льда}} = C_{p_{\text{воды}}} (20^\circ \text{C} - 0^\circ \text{C}) - 334 \text{ кДж/кг} \quad (12.10)$$

Расчет изменений энтальпии воды и муки приведен выше в уравнениях (12.5) и (12.6). Следует помнить, что соотношение воды и льда к муке по-прежнему  $0,65 \text{ кг/кг}$ . В ходе замеса баланс энтальпии определяется формулой:

$$\sum_{\text{ингредиентов}} M_i \Delta h_i = M_{\text{муки}} \Delta h_{\text{ш}} + M E_{\text{т}} = Q_j \quad (12.11)$$

Отвод тепла через рубашку снова определяет уравнение (12.7).

Два баланса энтальпии (уравнения (12.9) и (12.11)), должны решаться вместе относительно неизвестной видимой начальной температуры смеси и требуемого количества льда. Снова необходимо решение методом подбора. Начальная температура смеси оказывается равной около  $13,4^\circ \text{C}$ , а требуемое количество льда для получения конечной температуры теста около  $20^\circ \text{C}$  составляет примерно  $46,3 \text{ кг}$ , т. е. одна шестая часть воды в рецептуре должно вводиться в виде льда.

## 12.3.2 Некоторые вопросы конструирования тестомесильных машин и масштабирования

Тестомесильные машины разных типов имеют различную геометрию и скорости работы. Это ведет к некоторой путанице относительно требуемой механической энергии для замеса теста. Например, в [4] сообщается, что в тестомесильных машинах ста-

рых конструкций энергия, необходимая для развития теста, составляет 10–15 кДж/кг при времени замешивания около 30 минут. Более поздние тестомесилки, вероятно соответствующие современным тестомесилкам с горизонтальной перекадиной, требуют около 25 кДж/кг при продолжительности замеса около 12 минут, а чорливудский процесс, использующий высокоскоростные тестомесилки, требует 40 кДж/кг при времени замешивания около 3 минут. Ранее отмечалось, что значения для чорливудского процесса могут значительно варьироваться [21, 63, 64]. Данные для количественной оценки ожидаемых отклонений необходимой затраченной работы для тестомесилок с горизонтальной перекадиной отсутствуют. Можно ожидать, что эти отклонения могут быть такими же по величине, что и наблюдаемые для чорливудского процесса (энергия может отличаться примерно в четыре раза). Тем не менее для оценки скорости рассеяния мощности для различных типов тестомесилок можно использовать значения, приводимые в работе [4]. Это позволяет инженеру оценить мощность двигателя, необходимую для различных конструкций тестомесилок.

Например, старая медленная тестомесилка имеет среднюю нагрузку двигателя около 0,007 кВт/кг, современная тестомесилка с горизонтальной перекадиной — около 0,035 кВт/кг; высокоскоростные тестомесилки, используемые в чорливудском процессе, — около 0,22 кВт/кг. Заметьте, что это средние значения. Для тестомесилки *Tweedy* среднее и максимальное значения близки, поскольку эта тестомесилка обычно работает при максимальной или близкой к ней мощности [25, 50]. Неудивительно, что при этом значения требуемой от тестомесилки *Tweedy* мощности близки к значениям мощностей двигателей, приводимых изготовителем (табл. 12.7 и 12.8). Для горизонтальной тестомесилки пиковая потребляемая мощность значительно больше средней. Используя соотношение максимальной мощности к средней, равное около 1,25, получаем мощности двигателей, очень близкие к приведенным выше для тестомесилок с горизонтальной перекадиной (табл. 12.4 и 12.5) и приемлемые оценки для мощностей, рекомендованных для тестомесилок с одной спиралью (табл. 12.2).

Имеется ряд работ [15, 18, 57, 65], в которых указывается, что для тестомесилок одного типа геометрия может значительно влиять на скорость развития и требуемую мощность.

В [65] проверялось влияние размера чашки миксографа. Подобие формы примерно соблюдалось для двух миксографов, имеющих емкости 35 и 10 г. Было обнаружено, что время, требуемое для достижения максимума, оставалось примерно одинаковым для обеих мешалок. Это предполагает, что если полная потребляемая энергия определяет степень развития теста, то потребляемая энергия на единицу массы теста одинакова для обеих этих мешалок. Результаты находятся в соответствии с работой [57], в которой показывается, что, если подобие геометрии сохраняется для тестомесилок различных размеров, то скорость потребления энергии не зависит от их размеров. Как следствие, за одно время замеса количество совершаемой работы одинаково и, вероятно, одинакова степень развития теста.

В работе [15] проверялась высокоскоростная тестомесильная система, имеющая смесительную камеру в форме восьмерки с двумя перекрещивающимися мешающими органами. Авторы работы обнаружили, что энергия, необходимая для развития теста, сильно зависела от конструкции месильных органов. Данные этих авторов приведены в табл. 12.11.

С учетом результатов, представленных в табл. 12.11, не удивительно, что данные по необходимой энергии для различных конструкций тестомесилок сильно варьируются.

Таблица 12.11

Тип органа	Требуется, Вт · ч/кг
Треугольник	7,8
Звезда	9,2
Гантель	13,4
Цилиндр-эксцентрик	17,4

Различная геометрия штифтов миксографа исследовалась в работе [18]. Было обнаружено, что при увеличении диаметра штифтов скорость развития теста возрастала, в результате уменьшалось время замеса. При изменении диаметра штифтов чашки от 1/8 до 1/4 дюйма (от 3 до 6 мм) при емкости чашки 35 г максимальный вращающий момент, развиваемый мешалкой, увеличивался примерно на 10%, потребляемая работа до пика возрастала примерно на 15%, а требуемое время замеса снижалось примерно на 15%. Авторы объясняют это тем, что увеличение диаметра штифтов уменьшает просвет между штифтами, и, как следствие, увеличивает коэффициент сдвига. Можно указать на то, что увеличение диаметра штифтов не только увеличивает коэффициент сдвига, но также увеличивает площадь поверхности рассеяния мощности. Поэтому можно ожидать, что просвет между движущимися и неподвижными поверхностями, например между роликами и стенкой, а также роликом и неподвижной перекладиной (в тестомесилке с горизонтальной перекладиной), — принципиальный вопрос для эффективности тестомесилки. Это касается и площади поверхности роликов. При испытаниях на небольших мешалках инженер должен уделять особое внимание поддержанию изготовителем геометрического подобия.

Изменение геометрии на различных типах тестомесилок изучалось в работах [23, 35]. Было обнаружено, что в широком диапазоне конструкций мешалок (челночная, спиральная, миксограф, фаринограф) каждый тип мешалок рассеивал энергию с разными скоростями и требовал поступления разной общей энергии и времени замеса для получения оптимального качества теста. К счастью, разные методы давали одинаковое качество теста, несмотря на достижение его развития разными путями. Это, по-видимому, означает, что не существует «лучшего» типа мешалки, и что с мешалкой почти любого типа можно получить приемлемые продукты. Выбор тестомесилки должен быть основан на стоимости, эффективности, гигиеничности, гибкости, необходимого места и т. д.

Увеличение скорости тестомесилки должно увеличивать потребляемую энергию. Реологические свойства теста весьма сложны. Однако в первом приближении можно рассматривать тесто как разжижающуюся при сдвиге текучую среду, которая может быть описана представленной ниже степенной зависимостью:

$$\tau = m \cdot \left| \frac{dv}{dy} \right|^{(n-1)} \frac{dv}{dy}. \quad (12.12)$$

Можно легко показать [57], что потребляемая мощность увеличивается с ростом скорости вращения в степени  $1 + n$ . При измерении вращающих моментов видно, что момент возрастает с ростом скорости вращения в степени  $n$ . В литературе можно найти ряд оценок показателя текучести  $n$ . Большинство значений находится в диапазоне 0,25–0,5. Например, в [19] получен показатель текучести 0,5 при измерении влияния скорости тестомесильной машины на вращающий момент в фаринографе. В работе [26] использовалась вискозиметрия с конусом и пластиной и измерялись показатели текучести между 0,3 и 0,5. В [27] было получено значение 0,5 для сладкого теста при применении вискозиметра с конусом и пластиной. В работе [30] для теста на основе крахмала приведено значение 0,28. Определение выполнено путем измерения сил на раскатывающем вальце. В [37] выполнялись реологические измерения вязкости теста для печенья. На основе этих измерений в [31] был определен показатель текучести — около 0,42 и значение показателя текучести — 0,41 для теста из муки твердой пшеницы. В работе [17] приводится значение 0,5 для теста из манной крупы. В [18] цитируется более ранняя работа [58], в которой описаны изменения высот пиков миксографа для хлебного теста как функция скорости миксографа. При изменении скорости от 76 до 100 об/мин высота пика (момента вращения) меняется от 40,5 до 44,3%. Эти данные можно легко преобразовать в оценку показателя текучести, нанося данные на логарифмическую бумагу (с логарифмическим масштабом по обеим осям), что дает показатель текучести 0,33.

В [9] рассматривалось влияние скорости на потребляемую энергию тестомесильных машин для печенья. Они указывают, что потребляемая мощность тестомесилки пропорциональна квадрату ее скорости. Это утверждение неверно, так как оно предполагает, что тесто не разжижается при сдвиге и может приближенно рассматриваться как истинная жидкость (показатель текучести = 1).

### 12.3.3 Управление замешиванием и его контроль

Управление процессом замешивания в тестомесилках принципиально важен для определения оптимальных времен замешивания, которые оптимизируют развитие теста. Используется два основных метода контроля развития теста и регулирования однородности и постоянства качества: общей затраченной работы и пикового развития теста.

Первый метод использует какое-либо устройство измерения мощности, обычно электрическое, для измерения общей работы, затраченной на вымешивание теста. Применение вымешивания до минимума общей энергии, затраченной на развитие теста, рассматривалось в [9, 21, 22, 35]. В работе [50] был предложен метод использования общей энергии при определенной скорости вымешивания для измерения затраченной работы и использование добавки воды для коррекции состава теста в целях его оптимального развития.

Второй метод заключается в использовании устройства измерения мощности для максимума или пика развития теста. Измерение максимального вращательного момента или мощности, развиваемых двигателем, определяет степень развития теста. В [40] обсуждается применение этого метода для определения пика развития теста. В [25, 63] рассматриваются другие устройства для измерения пика развития теста.

Вместо замеров параметров работы двигателя эти методы используют более прямые методы изменения реологических свойств теста.

## 12.4 Основные сведения о раскатывании и слоении теста

Раскатывание и слоение — очень важные составляющие операций обработки теста. Раскатывание — это превращение большой массы теста или толстой ленты в тонкую. Слоение (ламинирование) — это создание многослойной ленты теста, причем между слоями может быть помещено разделяющее их вещество, обычно шортенинг, но иногда и мучная подсыпка.

Раскатывание позволяет получать очень тонкие изделия. Конечно, это промышленный потомок скалки для раскатывания теста. Раскатыванием производится много изделий. Оно широко используется в производстве печенья, крекеров, пиццы, тонких хлебных изделий (например, питы и мацы), кондитерских изделий, тортов и национальных продуктов, таких как тако (кукурузных лепешек, сложенных вокруг начинки из мясного фарша или сыра) и тортильяс (плоских маисовых лепешек). В основном раскатывание раньше использовали при изготовлении изделий из теста, таких как равиоли, тортеллини (небольшие в форме круга изделия из теста, обычно наполненные мясом или сыром и подаваемые в супе или с соусом), яичная лапша и бантики (бабочки). Этот метод по-прежнему используется для получения яичной лапши, предназначенной для консервированных супов, и для производства лапши восточного стиля (рамен). В производстве закусок слоение широко используется для получения кукурузных чипсов, формованных картофельных чипсов и т. п.

Слоение или ламинирование теста используется по нескольким причинам. Наиболее важная причина — это получение слоистой структуры из жира и теста. Именно такая слоистая структура придает пирожным уникальную нежную структуру, а крекерам — чешуйчатую текстуру. Кроме того, тесто часто слоют для уменьшения упругих напряжений, которые накапливаются в предыдущих операциях обработки.

В литературе имеется информация о влиянии раскатывания на свойство теста. В [24] показано, что работа, затраченная на операции раскатывания, ведет к развитию и избыточному развитию теста аналогично тому, как это происходит при вымешивании. Многократные проходы через тестовальцовочную машину дает те же эффекты, что и вымешивание, т. е. недомес, оптимальное вымешивание и перемес. Авторы продемонстрировали это, измеряя газодерживающую способность теста, из которого изготавливали хлеб после повторяющегося раскатывания. В табл. 12.12 представлены полученные результаты.

Данные об объеме порции ясно указывают, что тесто недостаточно развито при 32 и менее раскатываниях, близко к оптимальному примерно после 42 раскатываний и избыточно развито или начинается обминка, если раскатываний более 42. Это поведение подобно наблюдаемому при прослеживании соотношения объема порции и времени вымешивания. Особенно интересна в этих результатах чувствительность свойств теста к затраченной при раскатывании работе. В [24] было обнаружено, что

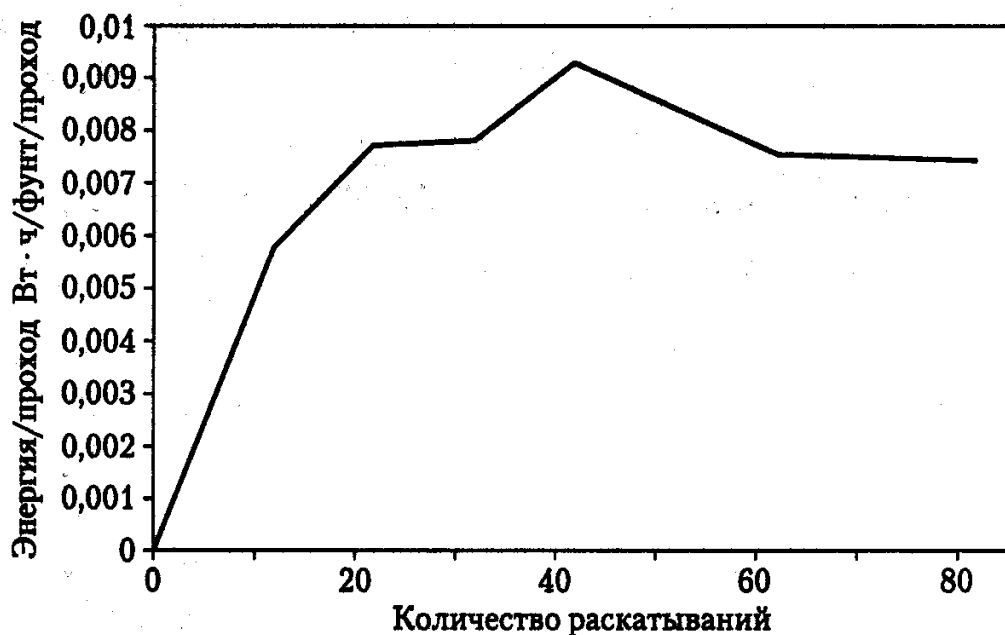


Рис. 12.13. Развитие теста раскатыванием

Таблица 12.12. Влияние повторного раскатывания на затраченную энергию и объем порции

Количество раскатываний	Затраченная энергия, Вт · ч/фунт	Объем порции, см <sup>3</sup>
12	0,07	770
22	0,17	875
32	0,25	925
42	0,39	935
62	0,47	910
82	0,61	880

энергия, необходимая для оптимального развития теста раскатыванием (вальцовкой) составляла лишь 10–15% объема работы, получаемой от тестомесильной машины. Это показывает, что раскатывание может иметь огромное влияние на качество теста.

В [32] проверены данные [24]. Анализ, приведенный на рис. 12.13, подтверждает, что раскатывание развивает тесто. Абсцисса графика (энергия/проход) прямо пропорциональна моменту вращения или количеству единиц Брабендера, полученным в описанном выше тесте на фаринографе. Ордината (количество раскатываний, или проходов) аналогична времени вымешивания. Сходство между рис. 12.13 и кривой фаринограммы, представленной на рис. 12.2, поразительно.

Имеется ряд других измерений, описанных в литературе, подтверждающих, что раскатывание приводит в напряженное состояние и ориентирует белки клейковины аналогично вымешиванию. Тесто из твердой пшеницы, используемое для макаронных изделий [13], и тесто из мягкой пшеницы, используемое для восточной лапши



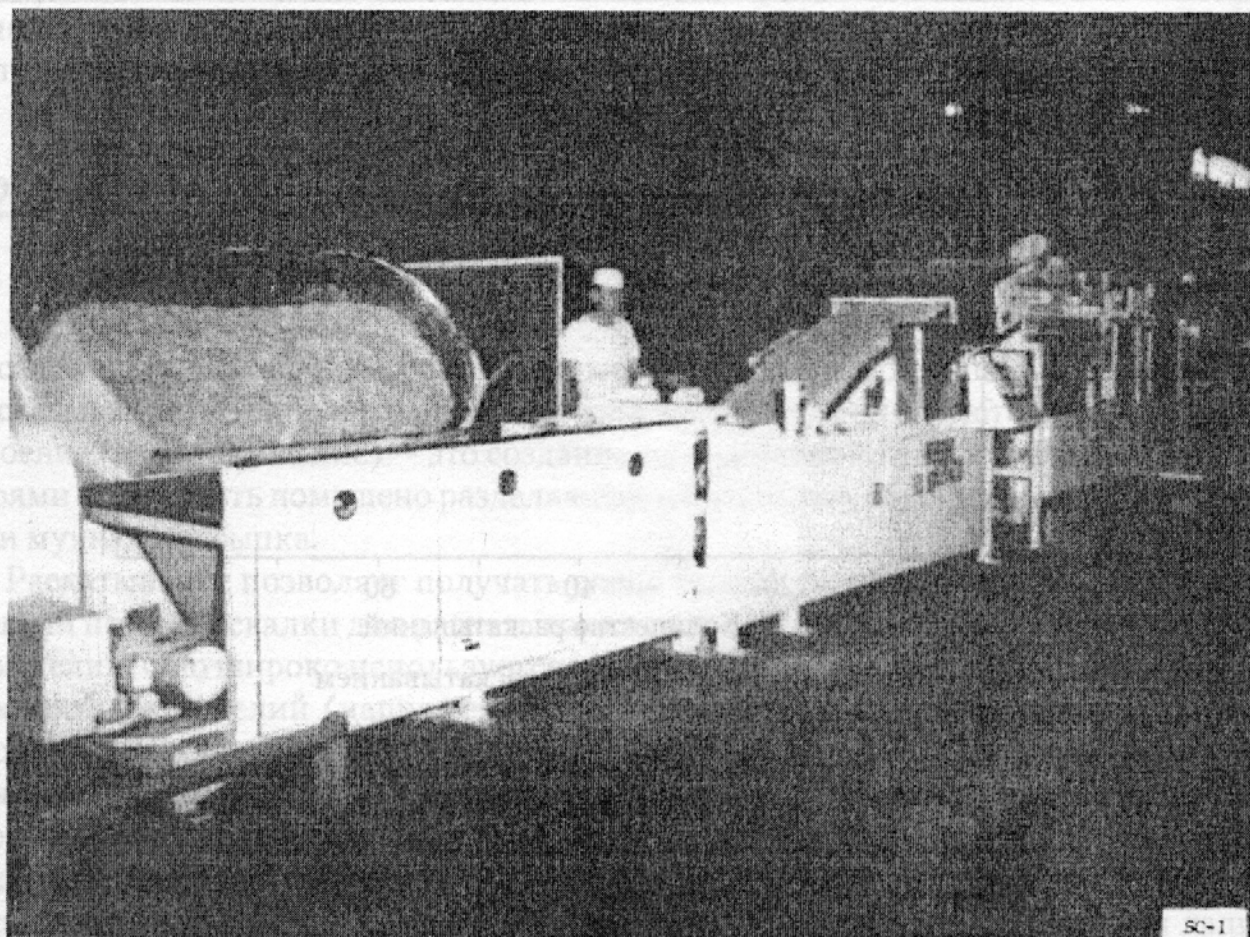


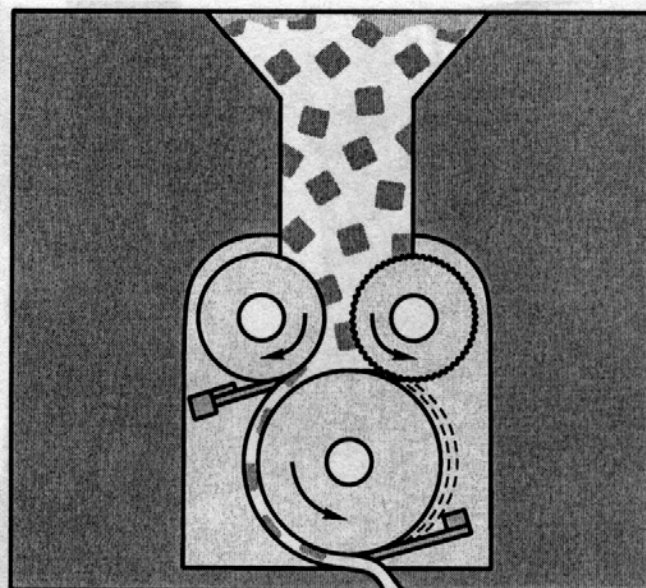
Рис. 12.14. Питатель с желобом (публикуется с разрешения *T. L. Green, Indianapolis, IN.*)

[60], демонстрировали ориентацию белка. Для теста из твердой пшеницы экстрагируемость клейковины, являющаяся мерой ее когезионной (связующей) способности, снижалась повторным раскатыванием. Этот эффект был отнесен за счет разрыва межмолекулярных дисульфидных связей. Микроскопическое изучение теста из твердой пшеницы показало, что раскатывание разрушает структуру белковой сети. Ориентирование белка является, вероятно, причиной анизотропии вальцованного теста (неоднородности свойств в разных направлениях).

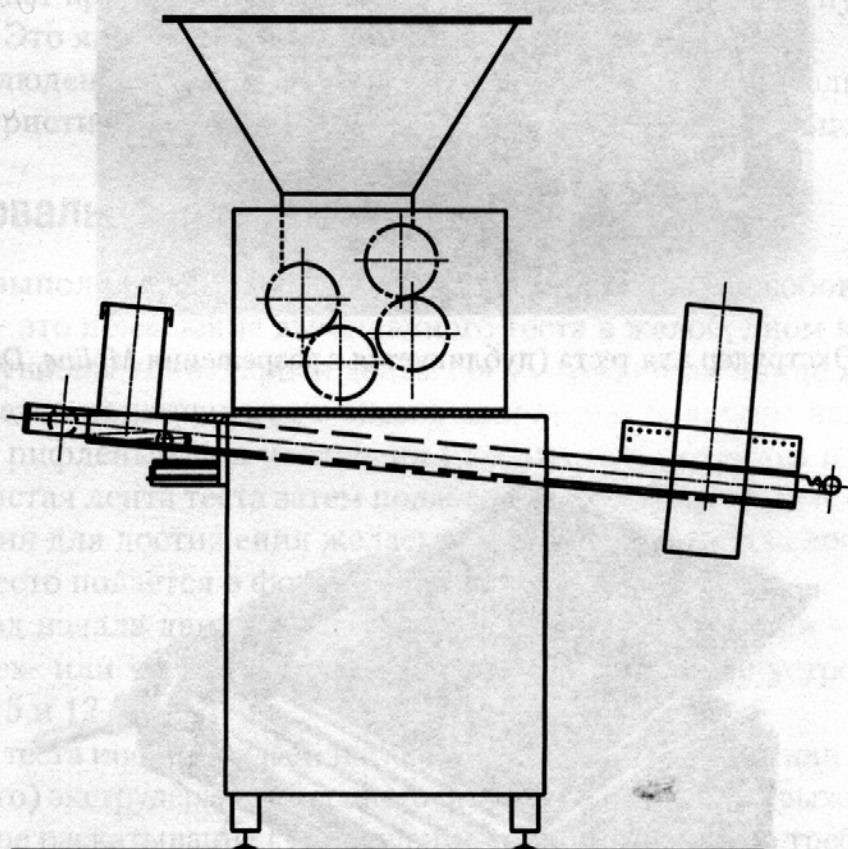
Подобные наблюдения выполнены в [43, 44]. В первой из этих работ сообщается, что раскатывание (вальцевание) теста привело к меньшей его растяжимости (максимальное растяжение перед разрывом) и пониженной эластичности. Автор предлагает при многократном раскатывании, как при изготовлении многослойных кондитерских изделий (пирожных), использовать более прочное тесто. Во второй работе показано, что условия раскатывания мягкого пшеничного теста для лапши ramen существенно влияли на конечную текстуру лапши.

Подобным образом в работе [38] указано, что потеря прочности теста с клейковиной, по-видимому, связана с накоплением деформаций сдвига. Работа тестовальцовочных машин основана на приложении срезающих напряжений к тесту, поэтому при раскатывании деформация сдвига должна накапливаться.

Некоторые авторы [36, 47, 55] указывают, что раскатывание удаляет газ из теста. Известно, что воздушные пузыри действуют как зародыши роста пузырей при выра-



**Рис. 12.15.** Тестовальцовочное устройство с тремя вальцами  
(публикуется с разрешения *Rykaart, Inc., Hamilton, OH.*)



**Рис. 12.16.** Тестовальцовочное устройство с четырьмя вальцами  
(публикуется с разрешения *Rademacher, Inc., Hudson, OH.*)

батовании углекислого газа дрожжами и химическими разрыхлителями, а также при выделении водяного пара в процессе выпечки. В результате при раскатывании поры в выпечных изделиях получаются более мелкими. Вероятно, это одна из причин «прессования» (раскатывания) некоторых видов хлебного теста в буханки перед расстойкой и выпечкой.



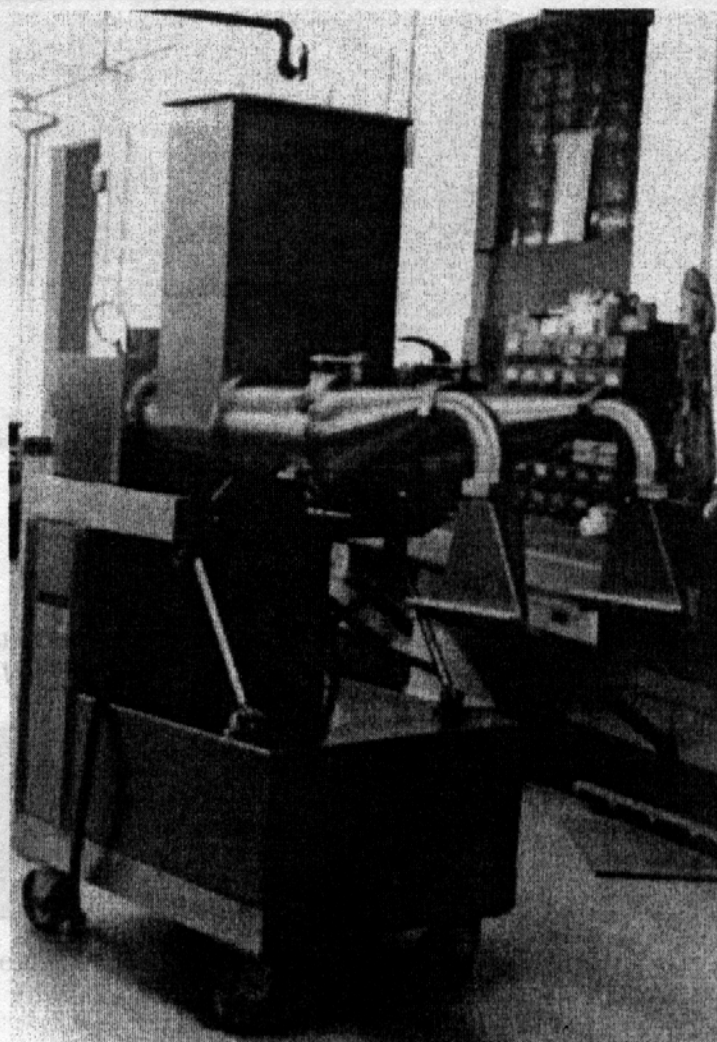


Рис. 12.17. Экструдер для теста (публикуется с разрешения *Moline, Duluth, MN.*)

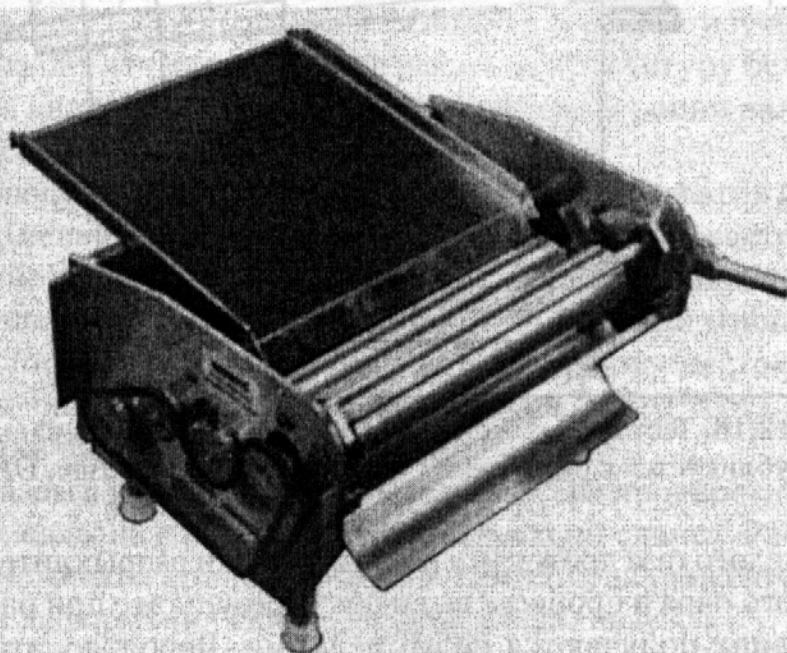


Рис. 12.18. Настольная тестовальцовка (публикуется с разрешения *Moline, Duluth, MN.*)

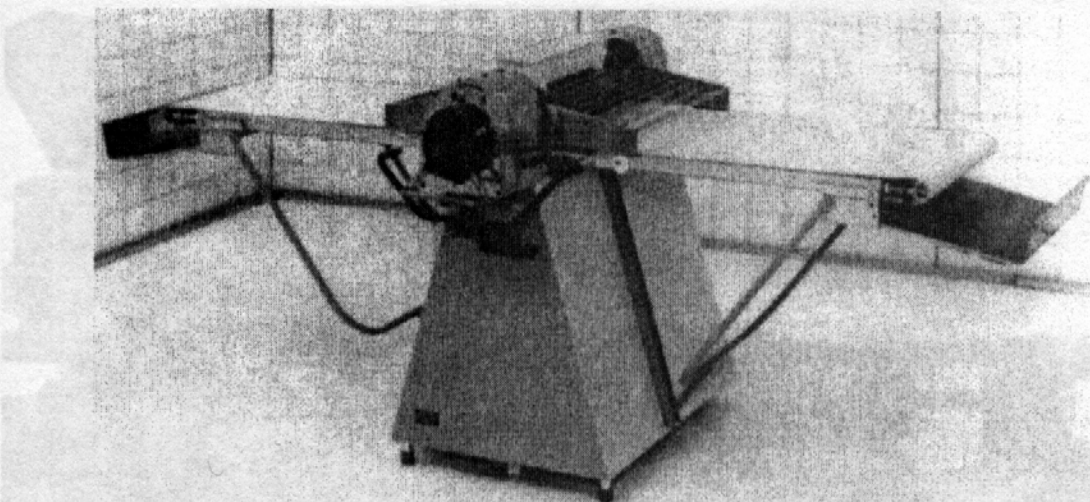


Рис. 12.19. Реверсивная тестовальцовка (публикуется с разрешения *Rondo, Hackensack, NJ.*)

В работе [29] указывается, что избыточная вытяжка теста при одном проходе через вальцы создает круговую структуру, которая может нарушить нужную ламинарную структуру. Это явление будет рассмотрено ниже.

Все эти наблюдения показывают необходимость очень тщательного подхода к выбору характеристик, конструкции и режимов работы тестовальцовочных линий.

### 12.4.1 Тестовальцовочное оборудование

Раскатывание выполняется разными способами. Один из способов формирования грубой ленты — это помещение вымешанного теста в желоб, дном которого служит медленно движущаяся конвейерная лента. На разгрузочном конце желоба (корыта) тесто сдавливается движущимся с малой скоростью большим вальцом, который обычно делают рифленным для увеличения трения между тестом и вальцом. Сформированная толстая лента теста затем подается на дополнительные операции раскатывания/слоения для достижения желаемой толщины и числа слоев. На рис. 12.14 показано, как тесто подается в формирующий желоб.

Другой метод начала движения теста по вальцовочной линии — это подача кусков теста в трех- или четырехвальцовые тестовальцовочные устройства, показанные на рис. 12.15 и 12.16.

Грубая лента теста иногда создается с помощью одношнекового или многошнекового (многочервячного) экструдера, снабженного щелевой фильерой на выходе (рис. 12.17).

Многократное раскатывание (уменьшение толщины) обычно требуется для получения теста нужной конечной толщины и свойств. Простейшие устройства с малой производительностью, используемые для этого, — небольшие настольные тестовальцовки (рис. 12.18) или реверсивные тестовальцовки (рис. 12.19). В реверсивных тестовальцовках тесто помещают на ленту, которая подает его на пару вальцов. После выхода из вальцов тесто попадает на другую ленту, зазор уменьшается, и направление движения лент и вальцов меняется на противоположное. Многократное уменьшение на настольной тестовальцовке выполняется вручную путем повторной подачи теста, прошедшего через тестовальцовку. Эти типы устройств используются преимущественно для приготовления теста для пельменей, вареников и других изделий.



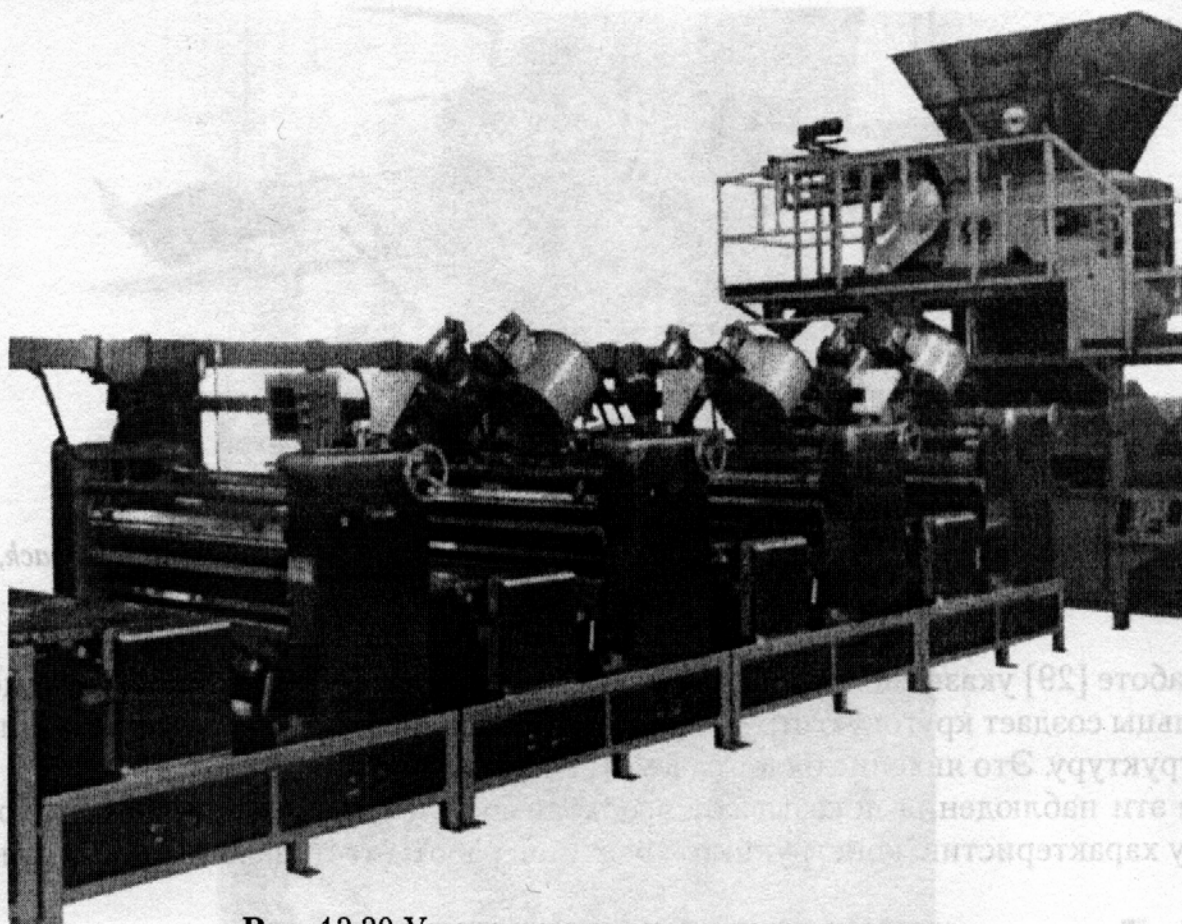


Рис. 12.20 Установка с четырьмя парами вальцов  
(публикуется с разрешения T.L. Green, Indianapolis, IN.)

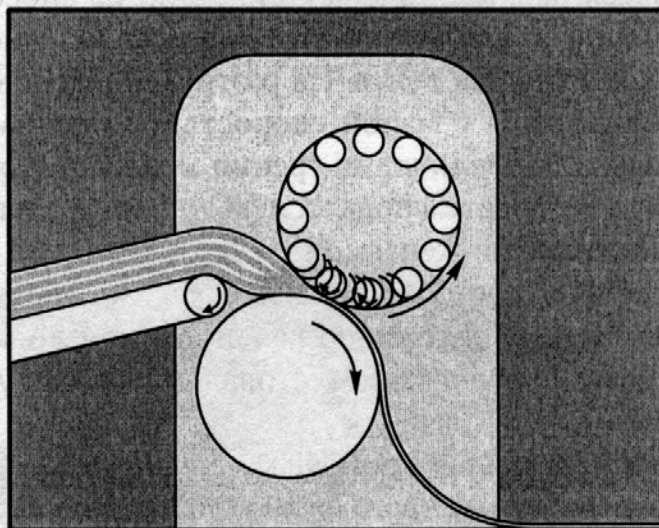


Рис. 12.21. Вытяжное устройство (публикуется с разрешения Rheon, Irvine, CA.)

щественно в работе небольших булочных-пекарен, продающих свою продукцию через собственные магазины.

Традиционно используются несколько пар последовательно установленных вальцов. На рис. 12.20 показана стойка с четырьмя парами вальцов. Тесто обычно перемещается между парами вальцов с помощью лент или ряда роликов, в некоторых конструкциях используется также гравитационный конвейер.

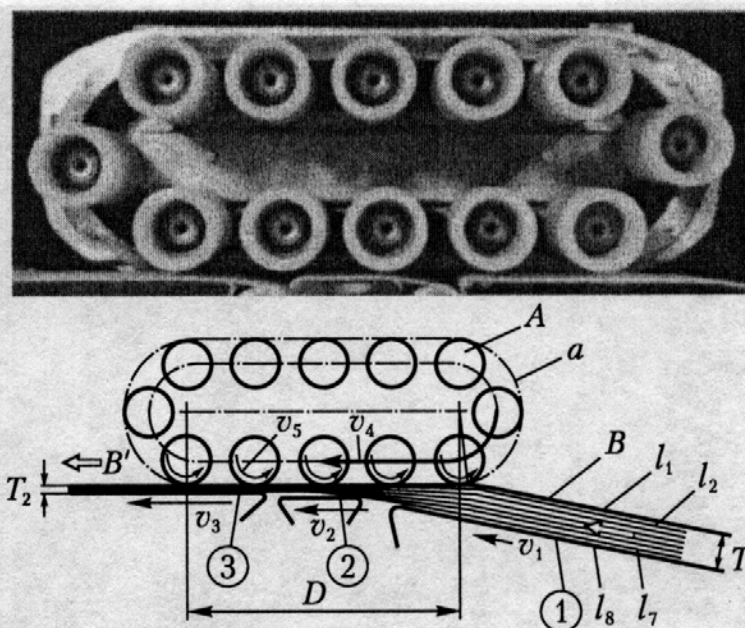


Рис. 12.22. Многовальцовое устройство (публикуется с разрешения *Rykaart, Inc., Hamilton, OH.*)

Другой подход реализован в вытяжном устройстве (рис. 12.21) или многовальцовой конструкции (рис. 12.22). Первое устройство использует много маленьких роликов,двигающихся навстречу тесту, лежащему на ряде лент. Второе устройство использует поворотную карусель из небольших роликов,двигающихся навстречу тесту, лежащему на большом вальце. Считается, что эти устройства уменьшают напряжение и давление на тесто по сравнению с традиционными парами вальцов.

Ширина теста иногда регулируется путем использования поперечных роликов (рис. 12.23). Ширина обычно регулируется в ограниченных пределах. Считается, что эти устройства уменьшают напряжения вдоль направления вальцевания.

## 12.4.2 Слоение теста

Для слоения теста необходимо создать слой отделяющего материала (например, шортенинга). Это делается несколькими путями. Один из методов — введение шортенингов, подаваемых в виде блоков в объемный насос со щелевой фильерой на выходе. Пример устройства введения шортенинга показан на рис. 12.24. Такие устройства обычно имеют экструзионные шнеки для выдавливания шортенинга в насос. Устройство с насосом может заменяться гидравлическим плунжером, который проталкивает блоки шортенинга через щелевую фильеру.

Другой метод, используемый для формирования листа шортенинга, — это подача его блоков в вальцовый экструдер (рис. 12.25), состоящий из пары рифленых вальцов, которые проталкивают шортенинг в щелевую фильеру. Вальцовый экструдер подобен машине для проволоочной резки, используемой для получения печенья. Функционирование таких устройств обсуждается в работе [31].

Слоение может быть начато по-разному. Один из методов — получение сэндвичей (рис. 12.26). Другой метод заключается в коэкструзии шортенинга в центр трубы из теста. Третий метод — укладка полосы выдавленного шортенинга на ленту теста. Затем тесто складывают так, как показано на рис. 12.27 и 12.28. Для формирования



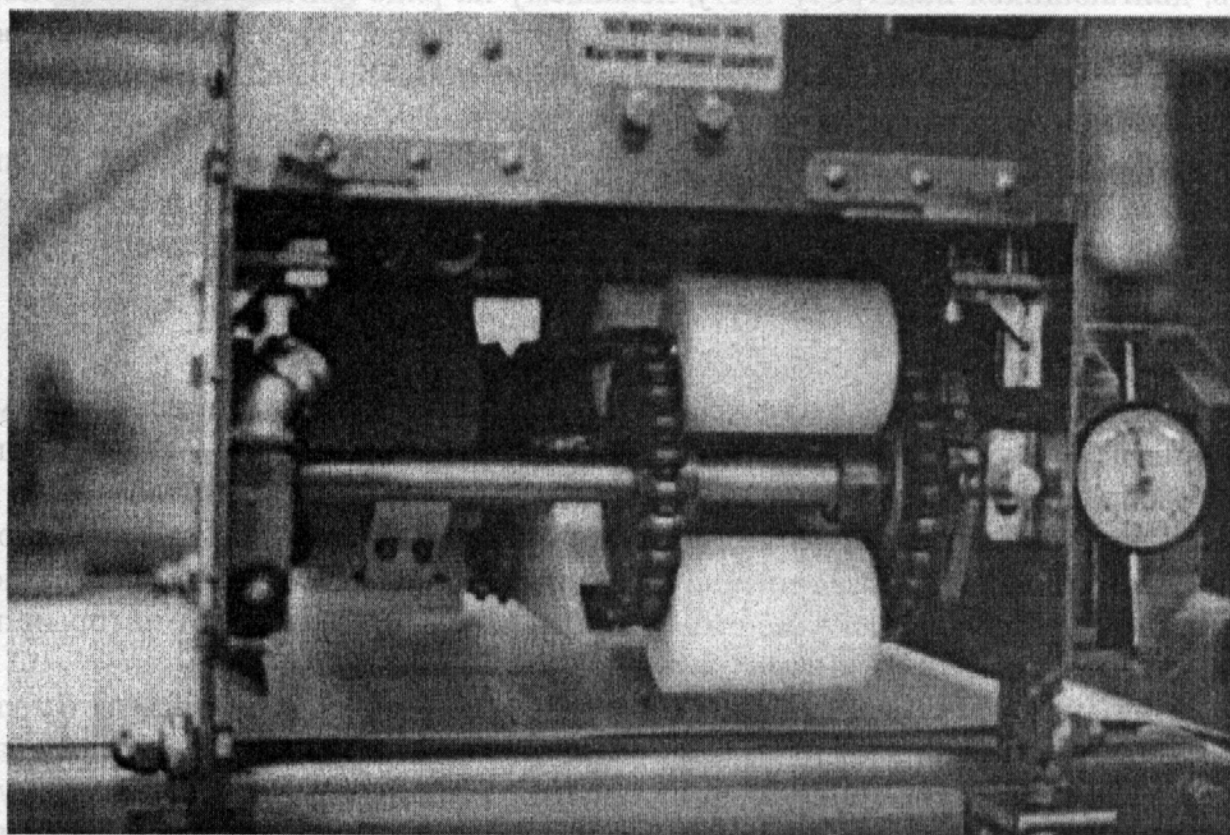
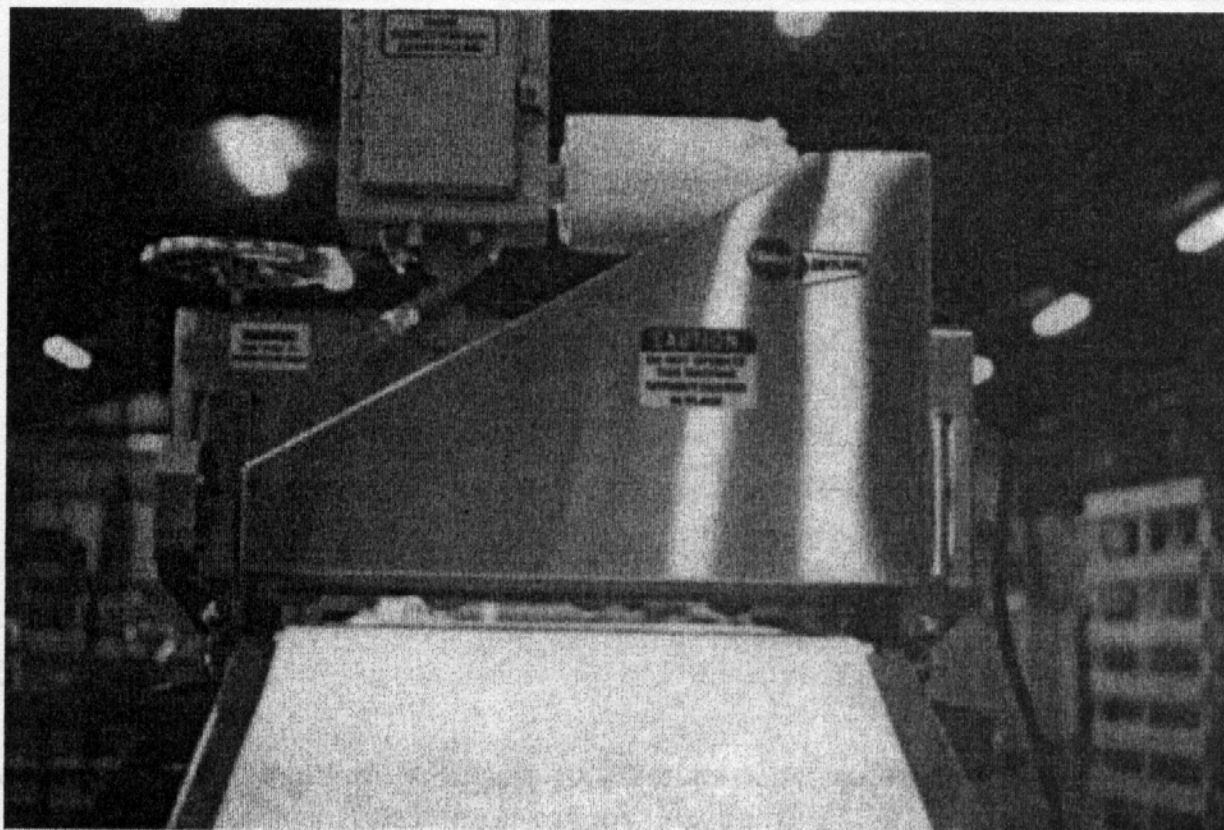
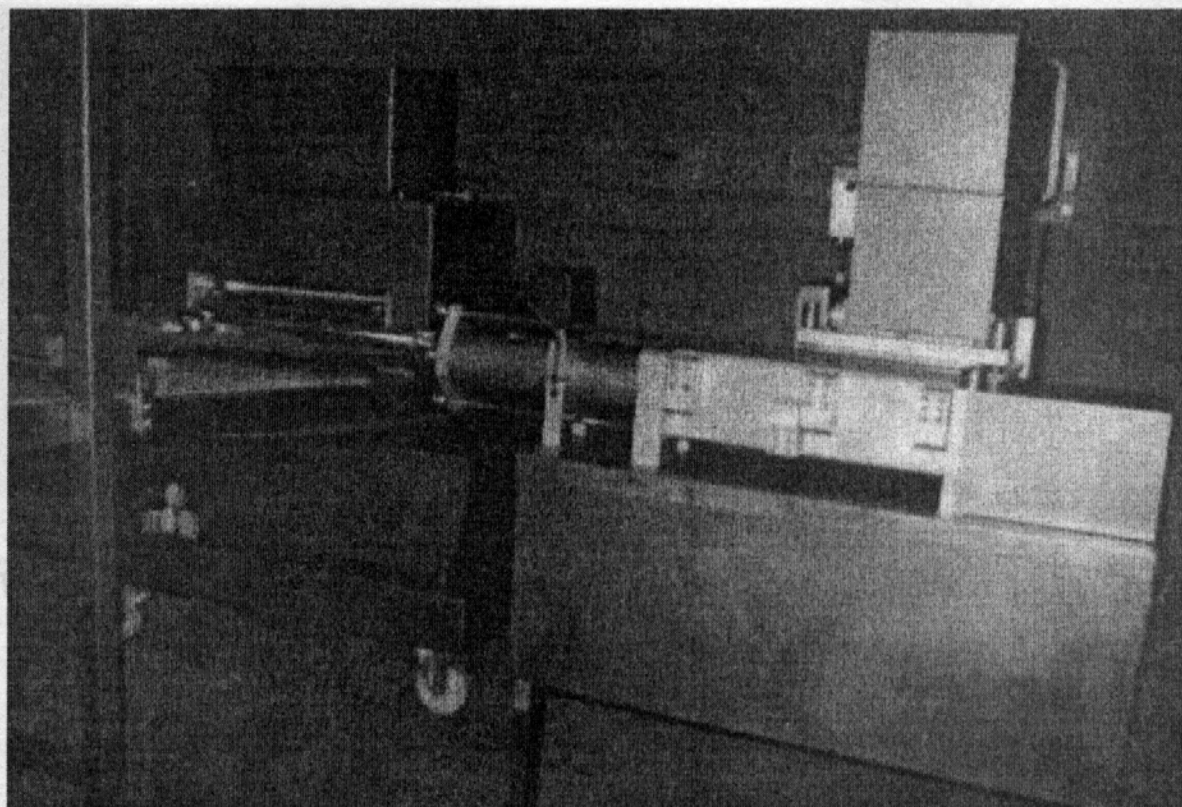
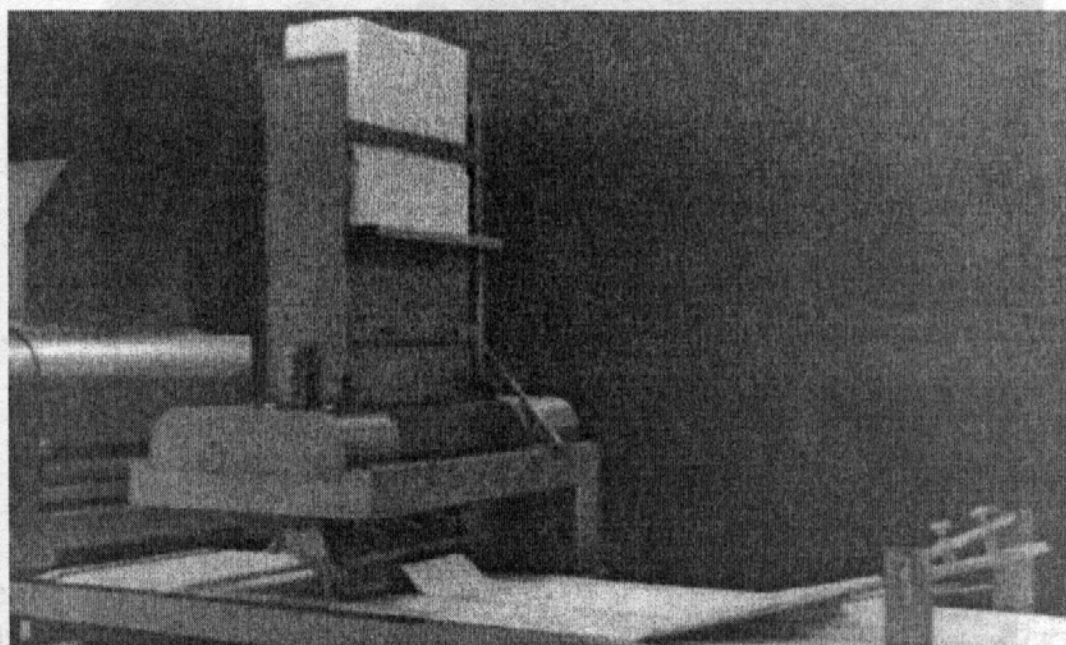


Рис. 12.23. Поперечный ролик (публикуется с разрешения *Moline, Duluth, MN.*)



**Рис. 12.24.** Устройство введения с насосом  
(публикуется с разрешения *Rademacher, Inc., Hudson, OH.*)



**Рис. 12.25.** Вальцовый экструдер для шортенинга  
(публикуется с разрешения *Rykaart, Inc., Hamilton, OH.*)

многослойного теста, применяемого для пирожных и крекеров, требуется дополнительное складывание и уменьшение толщины (раскатывание).

Этапы складывания и слоения исключаются при методе закатывания, показанном на рис. 12.29. Многослойная «веревка» теста, формируемая этим методом, должна быть уменьшена по толщине дополнительным раскатыванием.



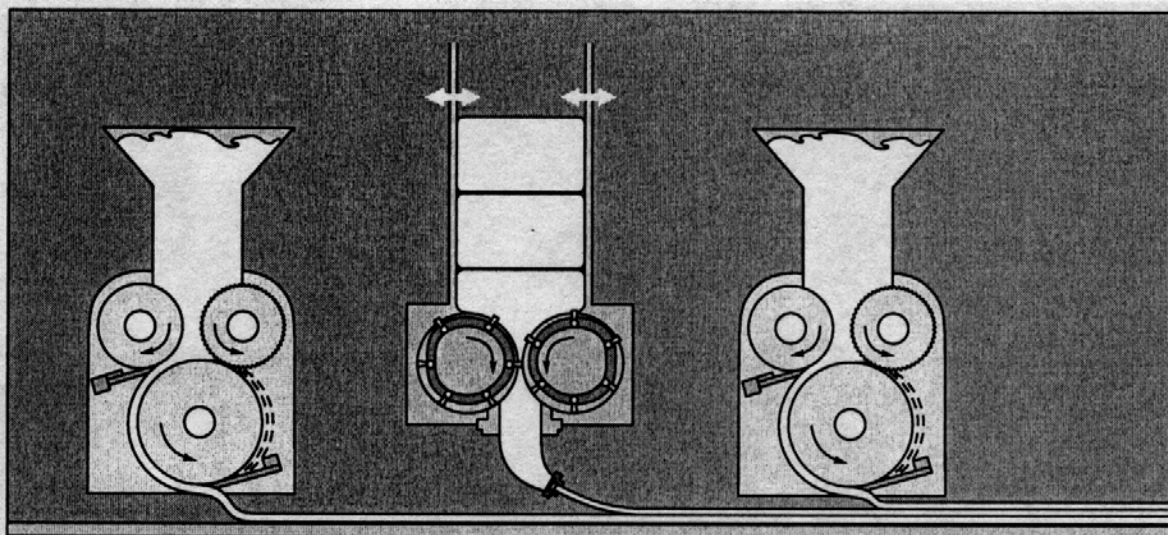


Рис. 12.26. Метод сэндвича (публикуется с разрешения *Rykaart, Inc., Hamilton, OH.*)

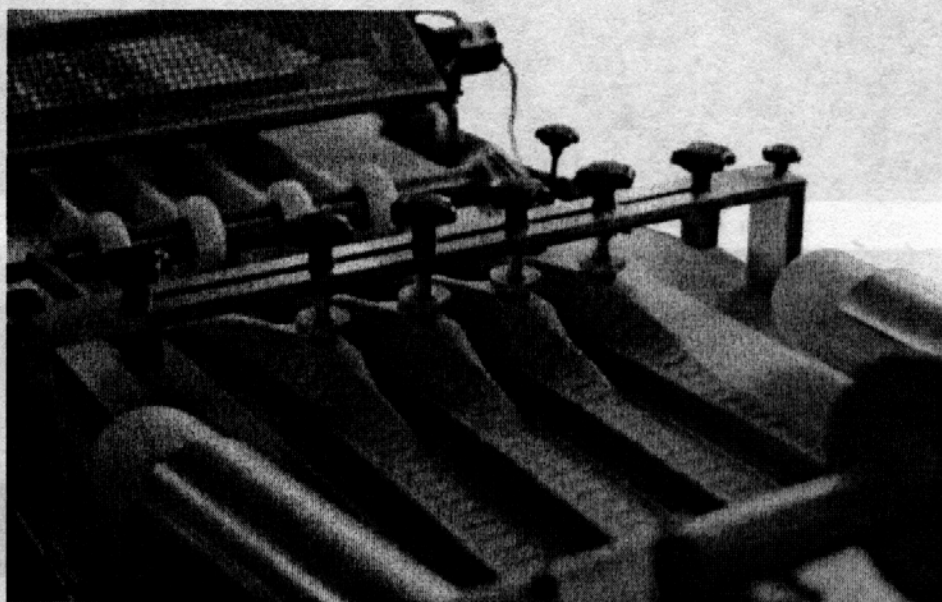


Рис. 12.27. Однократное складывание (публикуется с разрешения *Rheon, Irvine, CA.*)

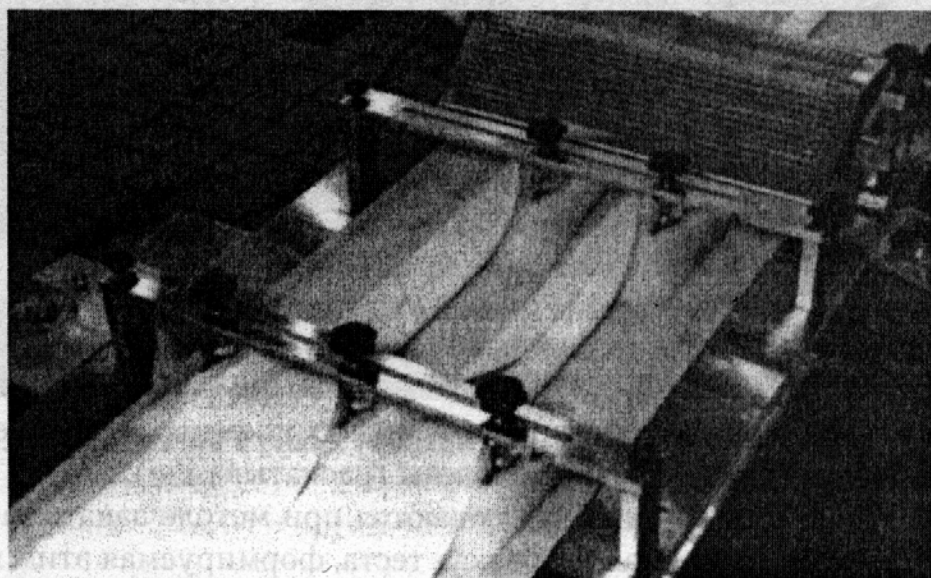


Рис. 12.28. Складывание конвертом (публикуется с разрешения *Rheon, Inc., Irvine, CA.*)

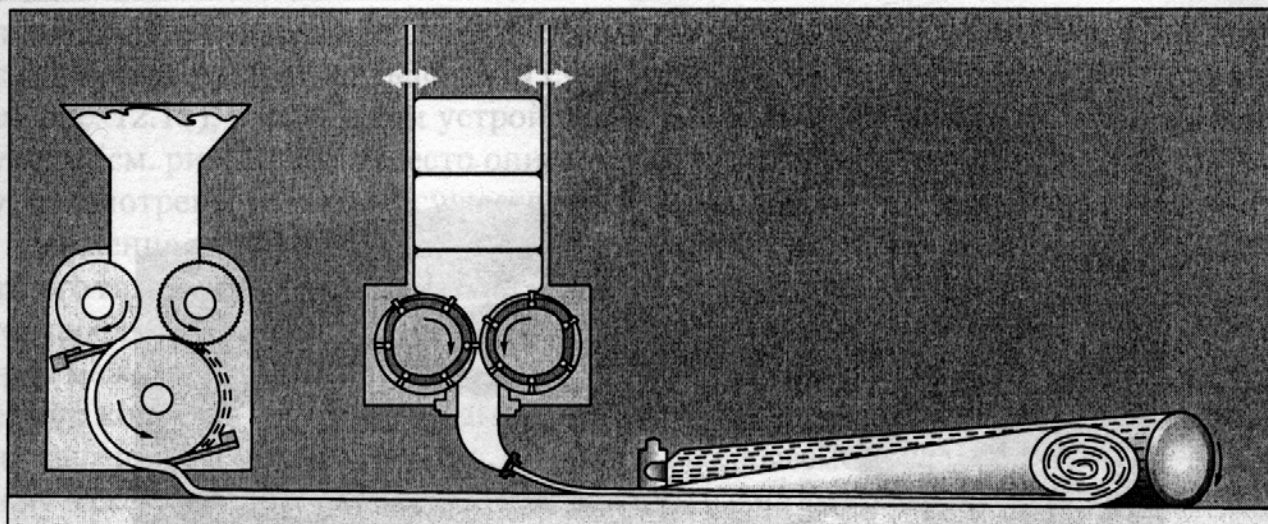


Рис. 12.29. Метод закатывания (публикуется с разрешения *Rykaart, Inc., Hamilton, OH.*)

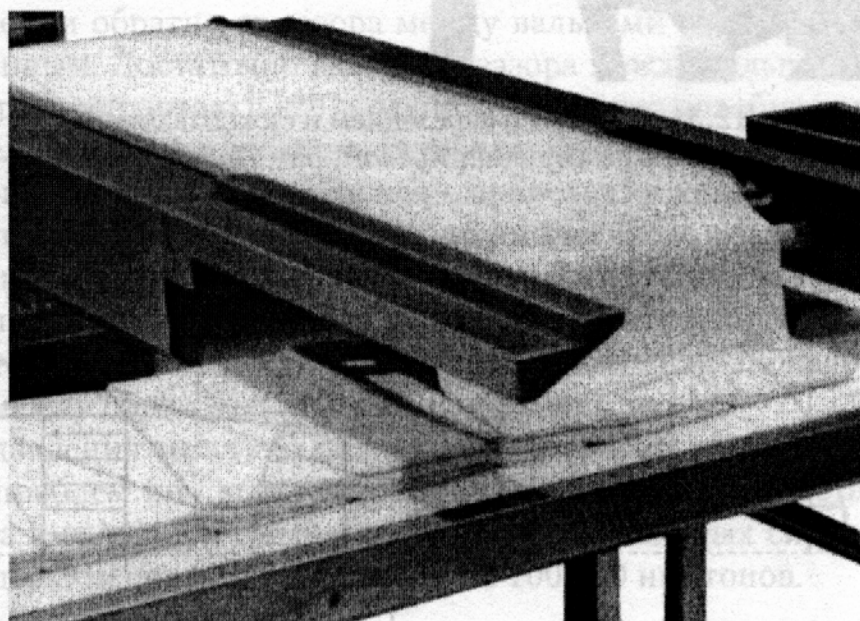


Рис. 12.30. Система накладки внахлест (публикуется с разрешения *Rykaart, Inc., Hamilton, OH.*)

Слоение для получения множества слоев теста и шортенинга из сэндвича с шортенингом в тесте, полученном «методом сэндвича», коэкструзии или складывания выполняется путем складывания теста внахлест (рис. 12.30) или нарезкой и складыванием кусков теста (рис. 12.31). После слоения толщину ленты уменьшают до желаемой конечной толщины дополнительными раскатываниями. Накладывание внахлест также используют для регулирования ширины ленты и распределения напряжений теста в продольном и поперечном направлениях.

Ряд компаний производят оборудование для раскатывания теста и слоения, например, *APV Baker Inc., Sasib Inc., Vickers Inc., Rykaart Inc., Rademacher Inc., T.L. Green Inc., Rheon Inc.* и *The Moline Company.*



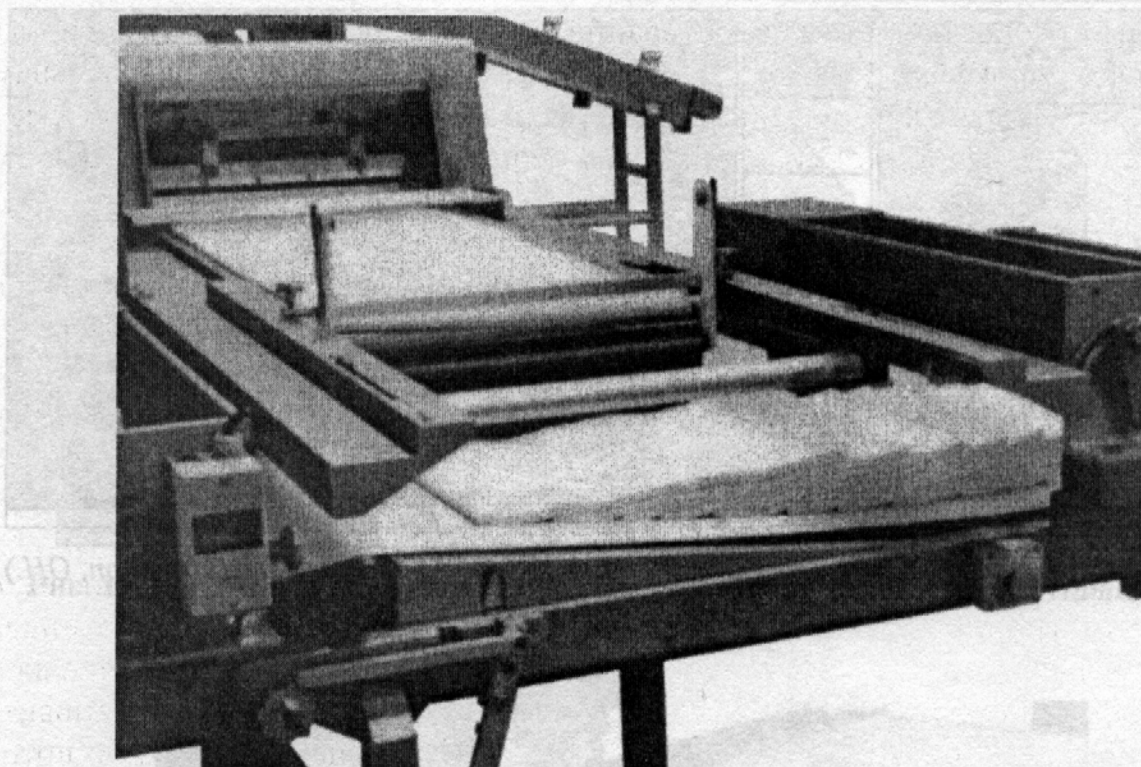


Рис. 12.31. Система с нарезанием и складыванием  
(публикуется с разрешения *Rykaart, Inc., Hamilton, OH.*)

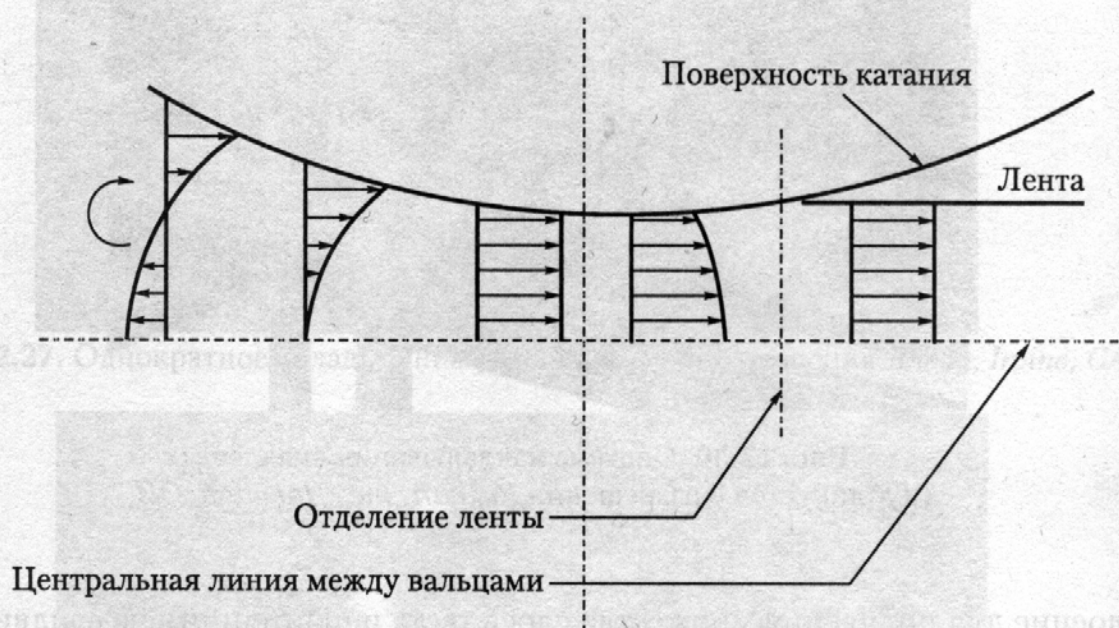


Рис. 12.32. Структура потока между вальцами

### 12.4.3 Технические вопросы операций вальцевания теста

Раскатывание теста аналогично каландрованию, используемому при производстве полимерных материалов. В работе [32] обсуждают математические теории раскатывания с помощью вальцов, работающих на равных скоростях. Эта работа дополняет литературу по полимерам (например, [5, 39]. В [30] развита теория вальцов, движу-

щихся с разной скоростью. Хотя раскатывание при разной скорости вальцов иногда используется с парой вальцов, это существенная часть системы с тремя вальцами (см. рис. 12.15), в вытяжном устройстве (см. рис. 12.21) и в многовальцовой конструкции (см. рис. 12.22). Вместо описания всех теоретических достижений ниже будут рассмотрены только их существенные аспекты.

Движение теста через пару вальцов является результатом сдвигового потока, вызванного тягой вальцов, приложенной к тесту. При проходе теста через вальцы развивается профиль давления, достигающий максимума давления непосредственно перед зазором между вальцами (точкой наименьшего зазора), а нулю давление равно в точке первого контакта теста с вальцами и в точке отделения теста от вальцов. Это изменение давления является, вероятно, причиной наблюдаемого удаления газа из теста, поэтому важен контроль давления развиваемого в системе раскатывания.

Развитие давления вызывает наложение напорных потоков на поток тяги. Этот напорный поток влияет на наблюдаемые срезающие напряжения и вызывает обратные потоки. На рис. 12.32 показана форма профилей скорости теста, возникающих между вальцами, движущимися с равной скоростью. Обратите внимание на то, что при движении обратно от зазора между вальцами обратный поток становится более выраженным. Достаточно далеко от зазора между вальцами вверх по потоку развивается круговой поток. В [29] предполагается, что подобная циркуляция вызывает нежелательное перемешивание, которое может наблюдаться как разрыв слоистых (ламинарных) структур. Это явление происходит, когда степень раскатывания (коэффициент вытяжки, соотношение толщины на входе к зазору) превышает величину, примерно равную трем. Поскольку получаемая толщина теста больше, чем зазор между вальцами (примерно в 1,5 раза), это, вероятно, объясняет, почему пекари считают, что толщину теста никогда не следует уменьшать больше чем в два раза за один проход между парой раскатывающих вальцов.

Развитие давления между вальцами обуславливает возникновение нескольких технических проблем при конструировании. Это давление действует во всей зоне контакта теста и вальцов и ведет к развитию значительных сил, стремящихся раздвинуть вальцы. Эти силы могут превышать 100 000 ньютонов.

#### 12.4.4 Оценка производительности, давления, сил и мощности тестовальцовочных машин

При анализе действия раскатных вальцов обычно предполагают, что реологические свойства теста могут быть описаны простой степенной моделью.

$$\tau = m \left| \frac{dv}{dy} \right|^{(n-1)} \frac{dv}{dy}. \quad (12.13)$$

Как указывалось выше, значение показателя текучести  $n$  для теста, вероятно, лежит в диапазоне от 0,25 до 0,5. Признано, что тесто проявляет значительные вязкоупругие свойства и объемную вязкость, но в анализе проблем раскатывания этой сложной текущей среды достигнуто весьма мало успехов.

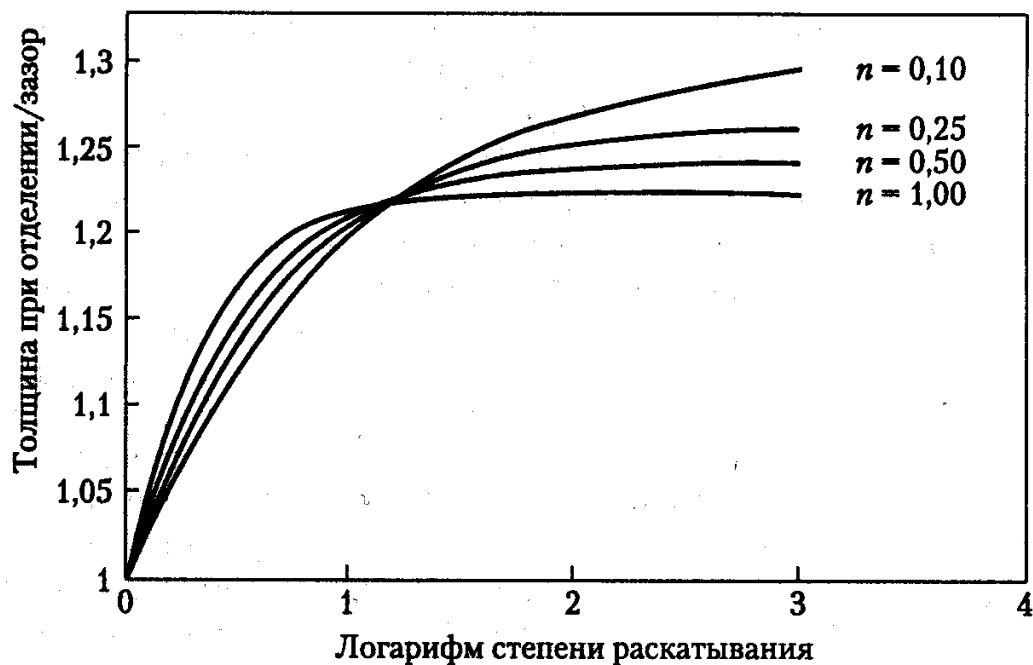


Рис. 12.33. Связь толщины при отделении и степени раскатывания (при одинаковых скоростях)

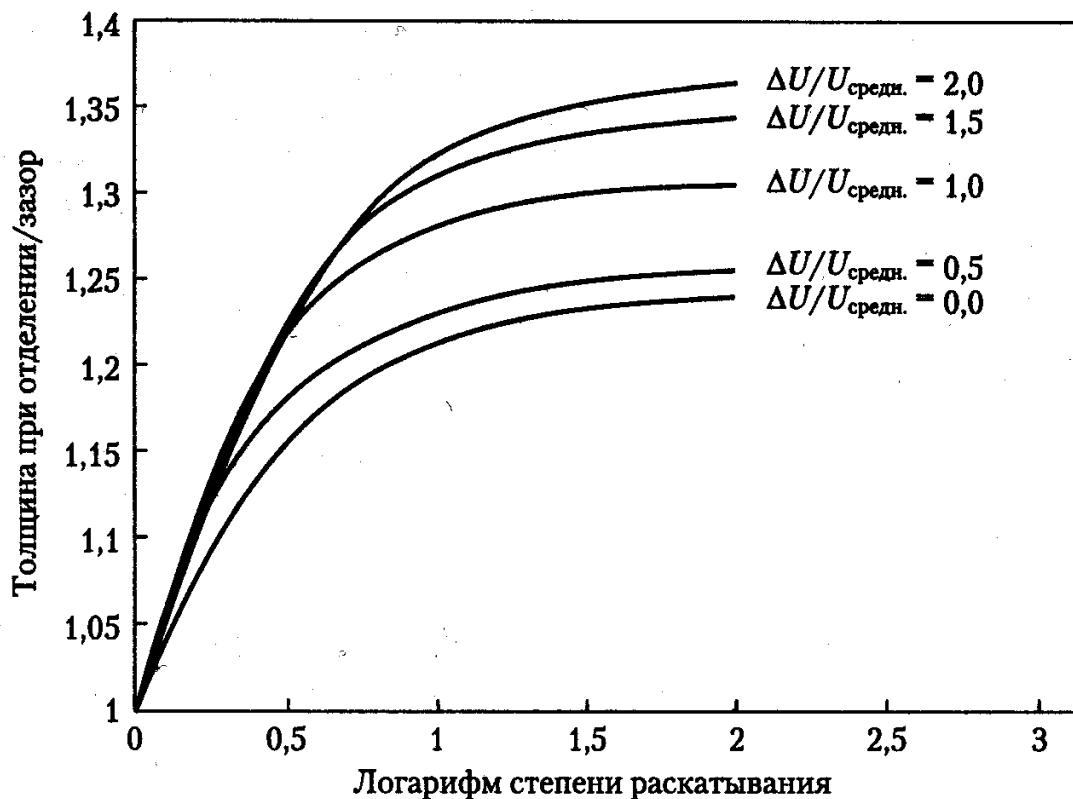


Рис. 12.34. Связь толщины при отделении и степени раскатывания (показатель текучести = 0,5)

Подача теста вальцами на единицу ширины ([28, 30, 32]) описывается формулой

$$\frac{Q}{W} = UB. \quad (12.14)$$

Соотношение толщины при отделении к величине зазора является функцией показателя текучести, степени раскатывания и разности скоростей вальцов. Это соотношение представлено на рис. 12.33–12.36. В работе [32] предполагается, что урав-

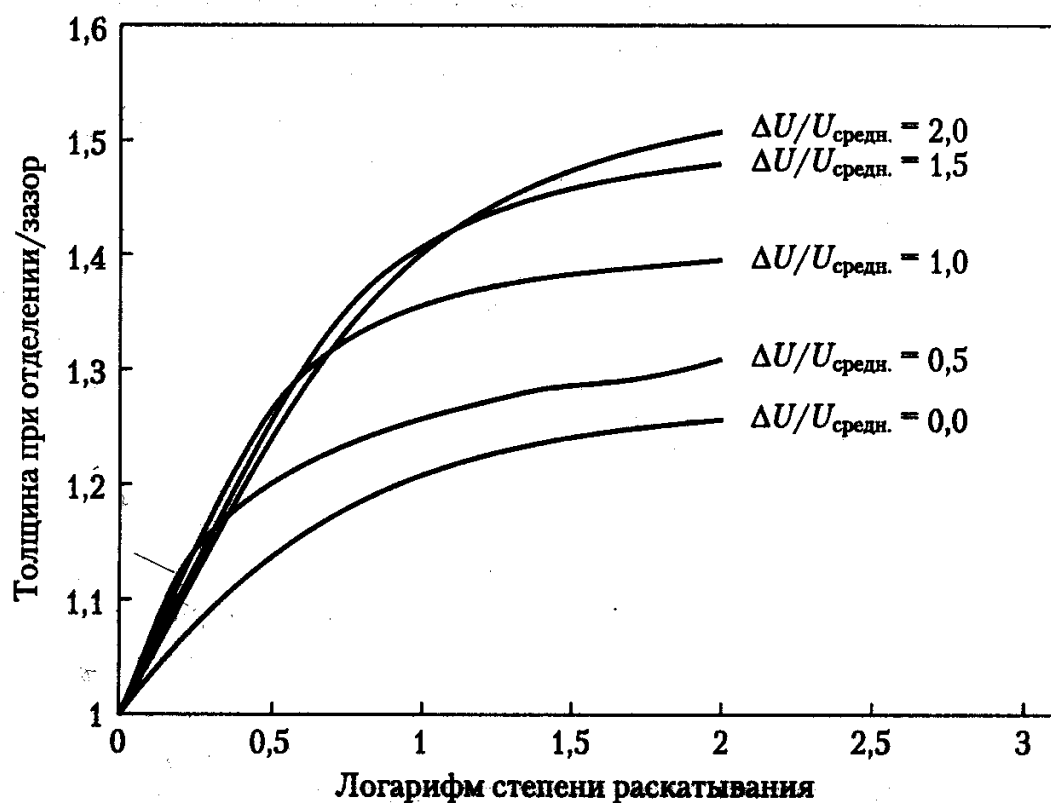


Рис. 12.35. Соотношение толщины при отделении и коэффициента раскатывания (показатель текучести = 0,25)

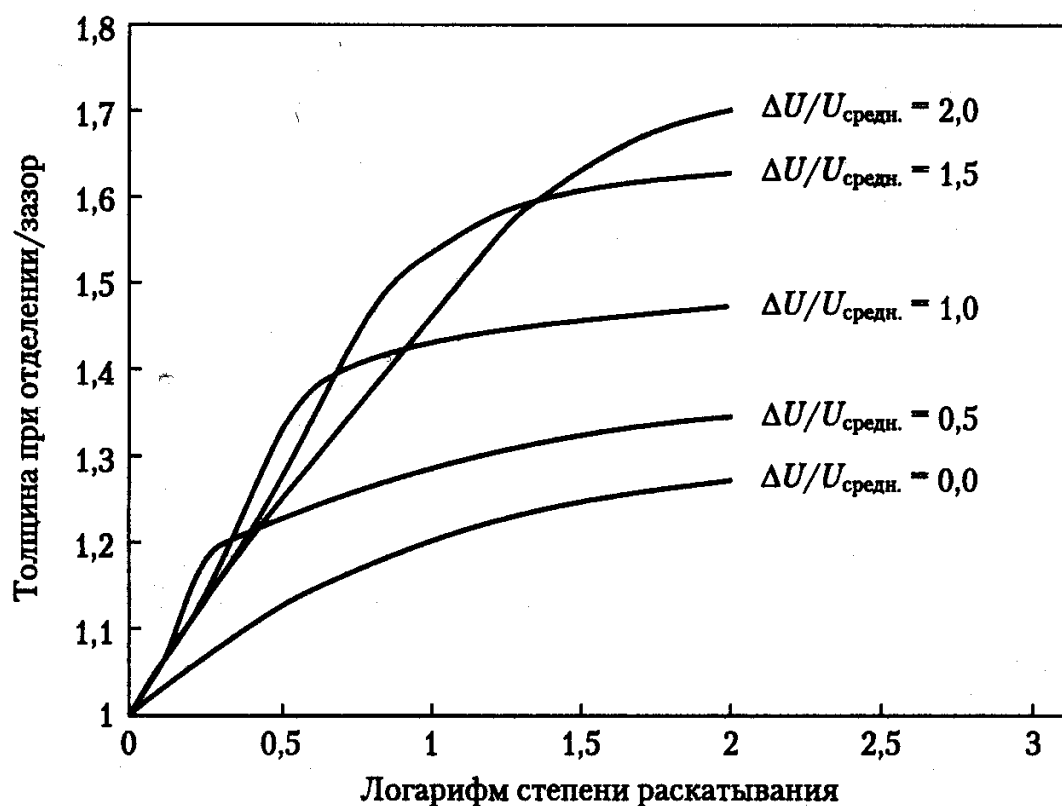


Рис. 12.36. Соотношение толщины при отделении и коэффициента раскатывания (показатель текучести = 0,11)

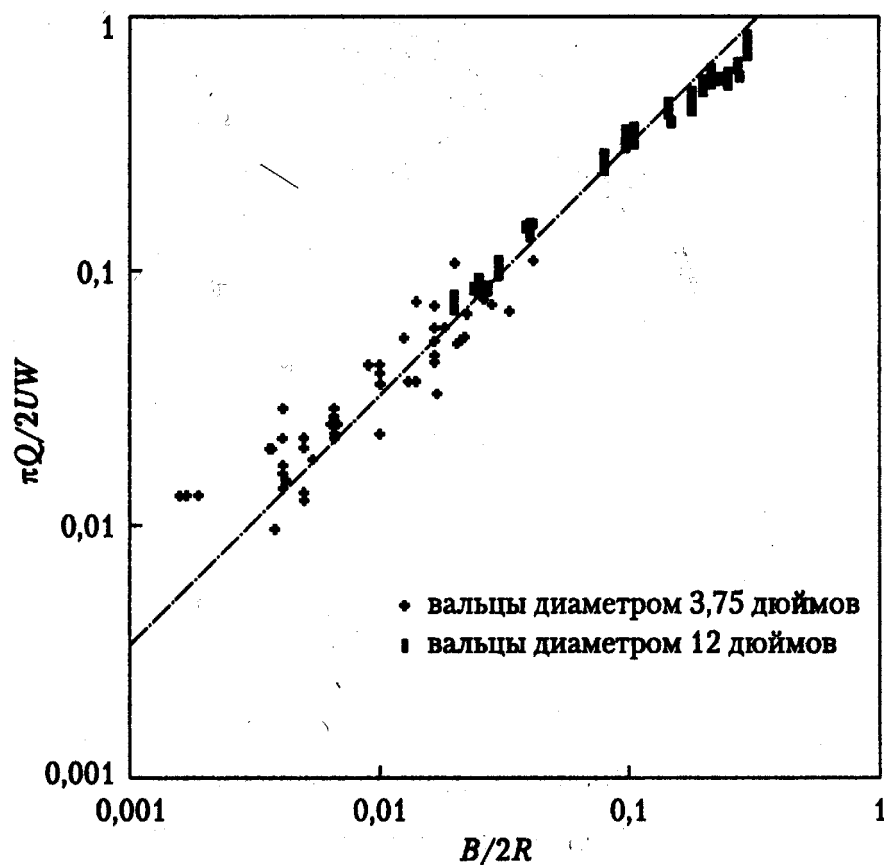


Рис. 12.37. Раскатывающая способность валцов

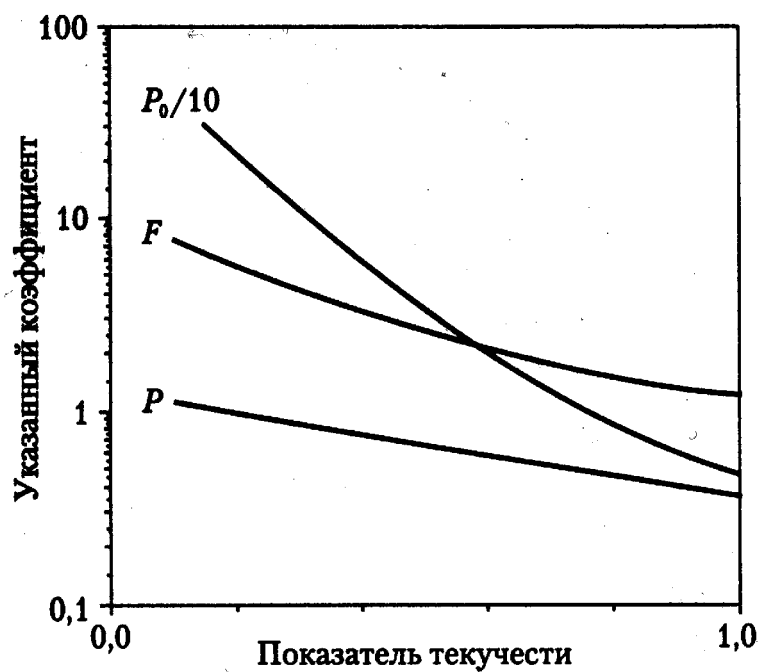


Рис. 12.38. Связь коэффициентов давления, силы и мощности с показателем текучести

нение 12.14 в обычном диапазоне раскатывания может быть корректно аппроксимировано следующим образом:

$$\frac{Q}{W} = 1,1UB_0. \quad (12.15)$$

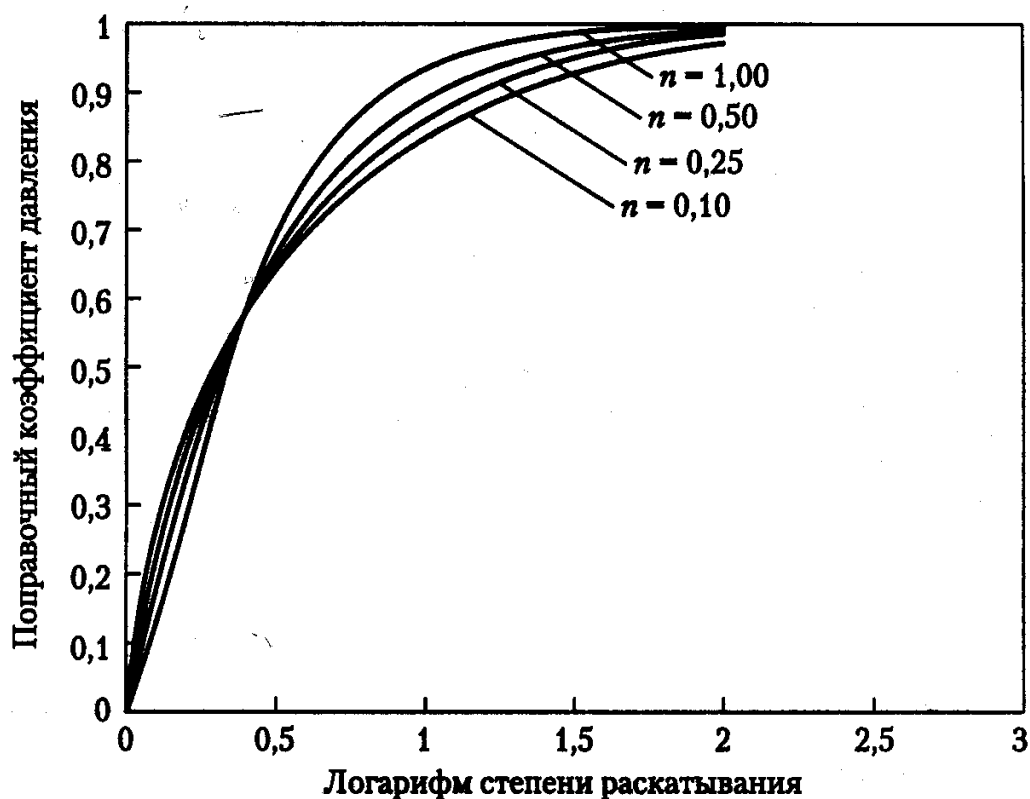


Рис. 12.39. Связь поправки давления (*pressure correction*) и степени раскатывания (при нулевой разности скоростей)

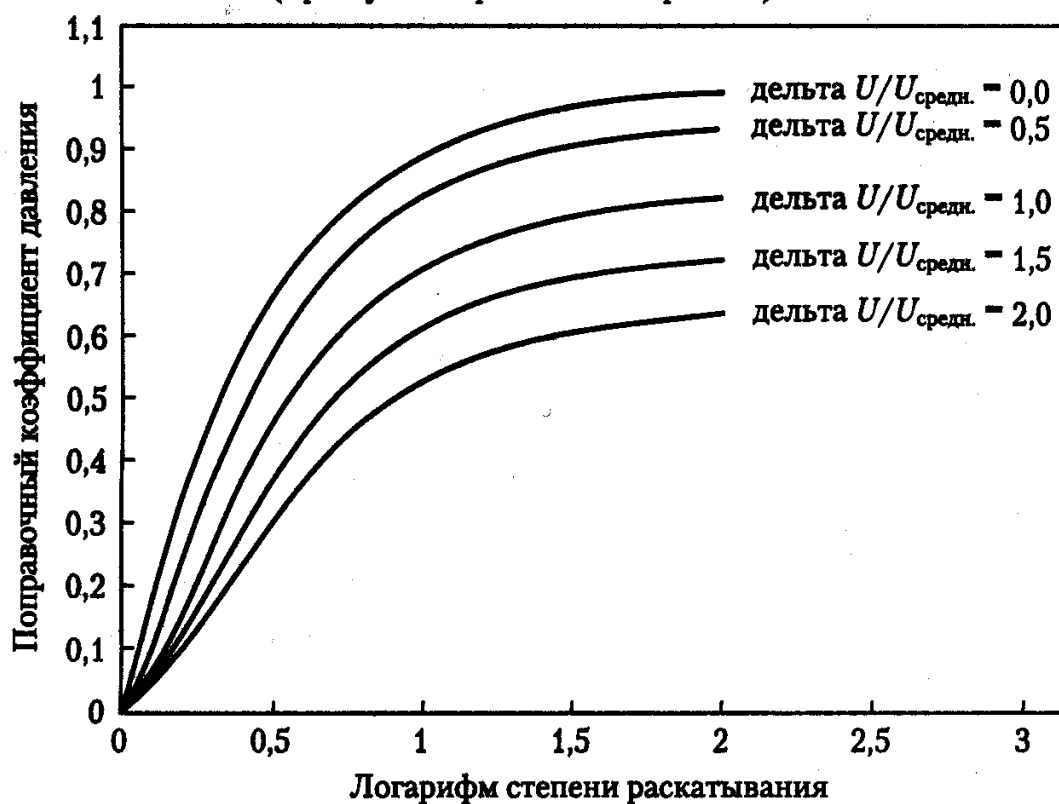


Рис. 12.40. Связь поправки давления (*pressure correction*) и степени раскатывания (показатель текучести = 0,5)

Данные, подтверждающие уравнение 12.15, иллюстрирует рис. 12.37. Обратите внимание, что подача теста пропорциональна средней скорости валцов и обратно пропорциональна зазору между ними.



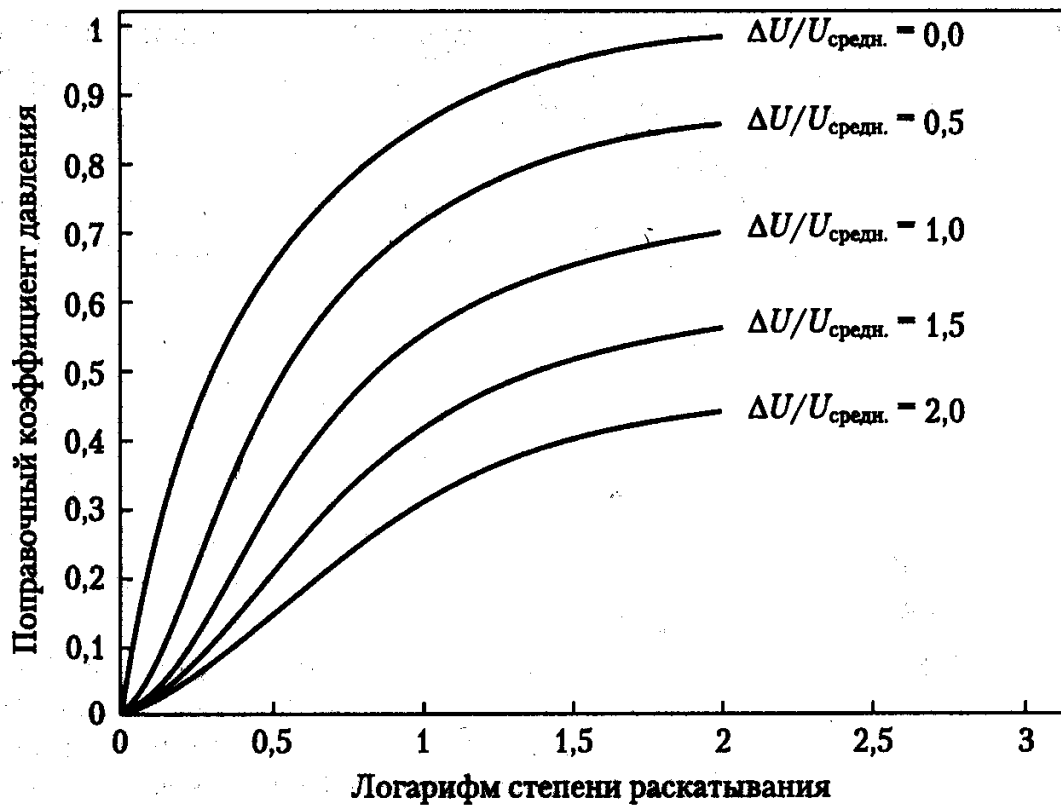


Рис. 12.41. Связь поправки давления и степени раскатывания (показатель текучести = 0,25)

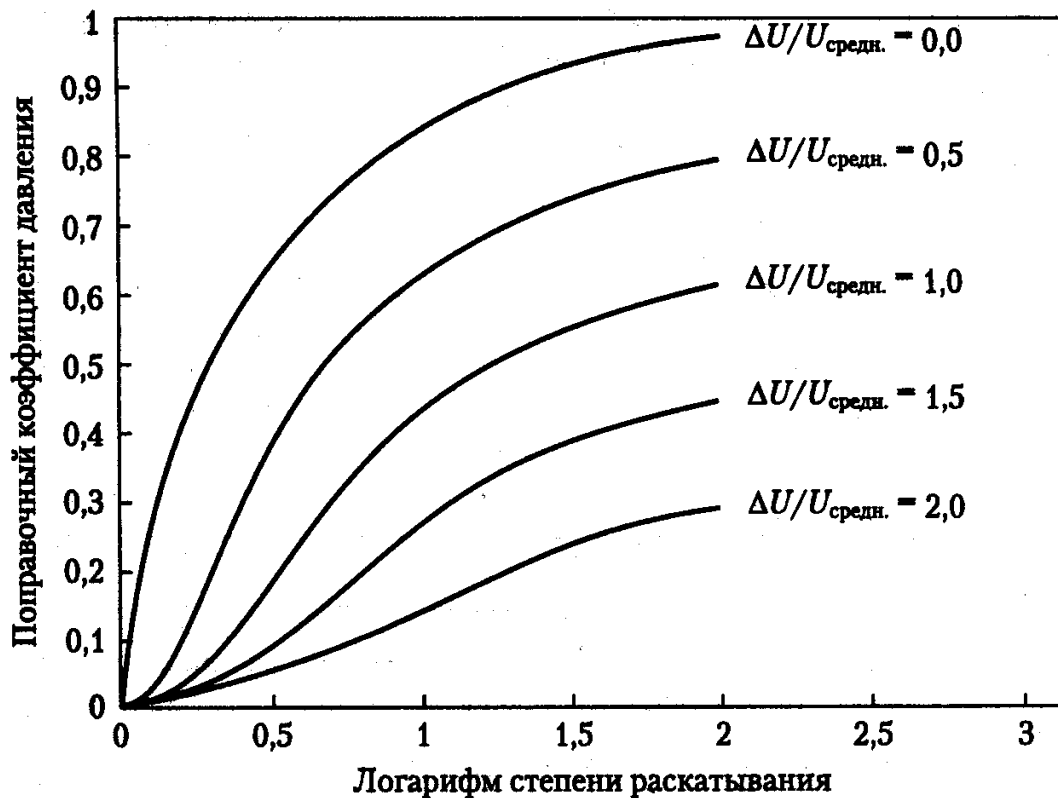


Рис. 12.42. Связь поправки давления и степени раскатывания (показатель текучести = 0,1)

Максимальное давление, развиваемое вальцами, дается уравнением (12.1)<sup>1</sup>. Для использования этого уравнения нужны два коэффициента. Старший коэффициент является функцией нижнего индекса. Этот коэффициент найден в [39] и представлен на рис. 12.38.

Коэффициент запаздывания является функцией показателя текучести, степени раскатывания и разности скоростей вальцов. Значения коэффициента запаздывания даны на рис. 12.39–12.42.

$$p_{\max} = P(n) m \left( \frac{2U}{B_0} \right)^n \sqrt{\frac{4R}{B_0}} C_p \left( r, n, \frac{\Delta U}{U} \right). \quad (12.16)$$

Давление, развиваемое вальцами, и, предположительно, тенденция дегазировать тесто увеличиваются со скоростью вальцов, их диаметром, степенью раскатывания и уменьшающим толщину ленты зазором.

Обратите внимание на то, что влияние разности скорости вальцов может быть сильно выражено. В диапазоне обычных степеней раскатывания введение разности скоростей может привести к снижению давления примерно в три раза при неизменной средней скорости вальцов. Это и использование небольших вальцов — одно из достоинств вытяжного устройства и многовальцовых систем, которые используют значительные разности скоростей между движущимися поверхностями.

Сила разделения, развиваемая вальцами, определяется уравнением (12.17). Как с уравнением развития давления, для его применения нужны два коэффициента. Старший коэффициент является функцией показателя текучести (см. рис. 12.38). Как и в случае уравнения для давления, коэффициент запаздывания является функцией показателя текучести, коэффициента раскатывания и разности скоростей вальцов. Значения коэффициентов запаздывания приведены на рис. 12.43–12.46.

$$\frac{F}{W} = F(n) m \left( \frac{2U}{B_0} \right)^n R C_f \left( r, n, \frac{\Delta U}{U} \right). \quad (12.17)$$

Сила разделения, развиваемая вальцами, и напряжения на вальцах, валах и подшипниках, увеличиваются с ростом скорости вальцов, их диаметром, степенью раскатывания и уменьшением зазора. Обратите внимание, что влияние разности скоростей вальцов может быть очень значительным. В диапазоне обычных степеней раскатывания введение разности скоростей может привести к уменьшению давления в 2–3 раза, при той же средней скорости вальцов. Этот фактор позволяет вытяжному устройству и многовальцовым системам, имеющим значительную разность скоростей между движущими поверхностями, использовать в своей конструкции вальцы меньшего диаметра без избыточного их отклонения (прогиба).

Мощность, необходимая для вращения вальцов и рассеяния в тесте, определяется уравнением (12.18). Как и в случае уравнений для давления и силы, имеется два

<sup>1</sup> Уравнения (12.16)–(12.18) можно модифицировать для вальцов неодинакового размера с помощью эквивалентного радиуса, определяемого как  $\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$ .

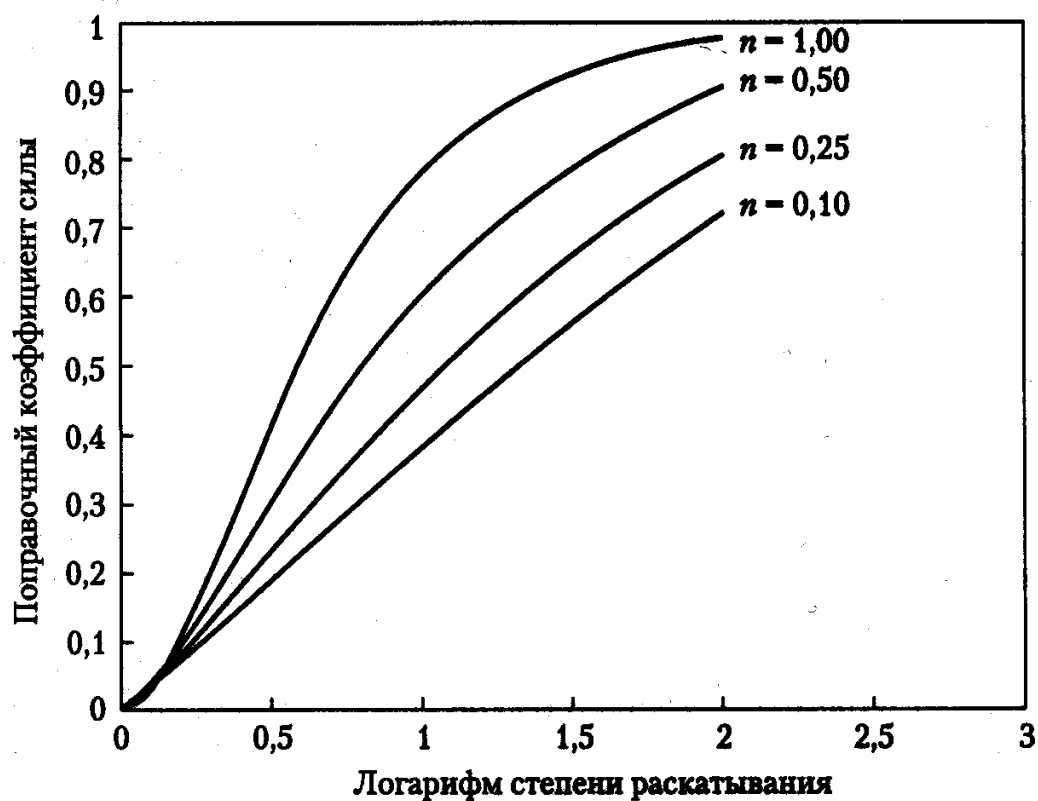


Рис. 12.43. Связь поправки давления и степени раскатывания (при нулевой разности скоростей)

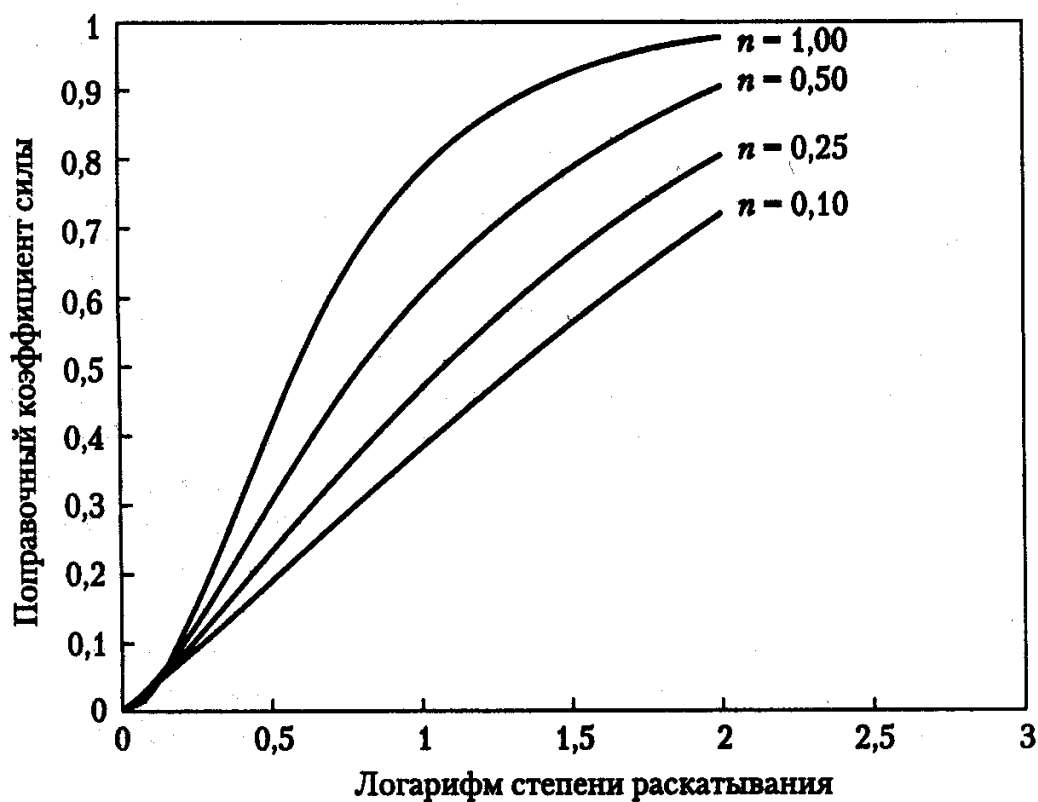


Рис. 12.44. Связь поправки силы и степени раскатывания (показатель текучести = 0,5)

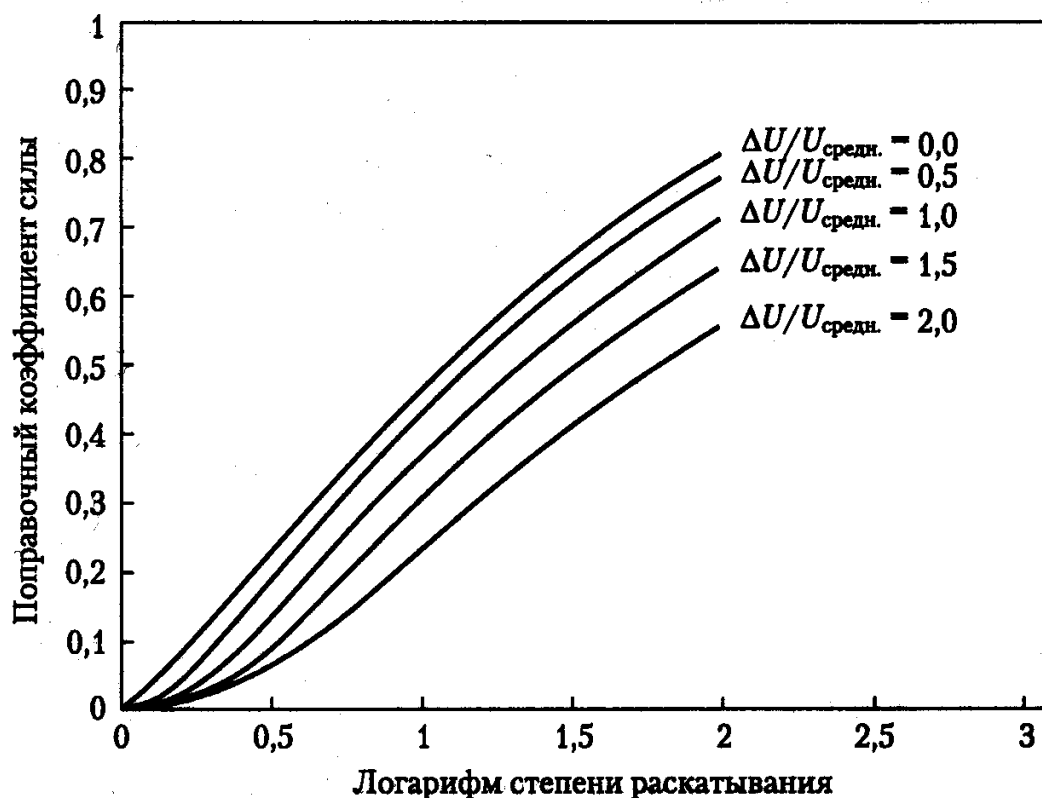


Рис. 12.45. Связь поправки силы и степени раскатывания (показатель текучести = 0,25)

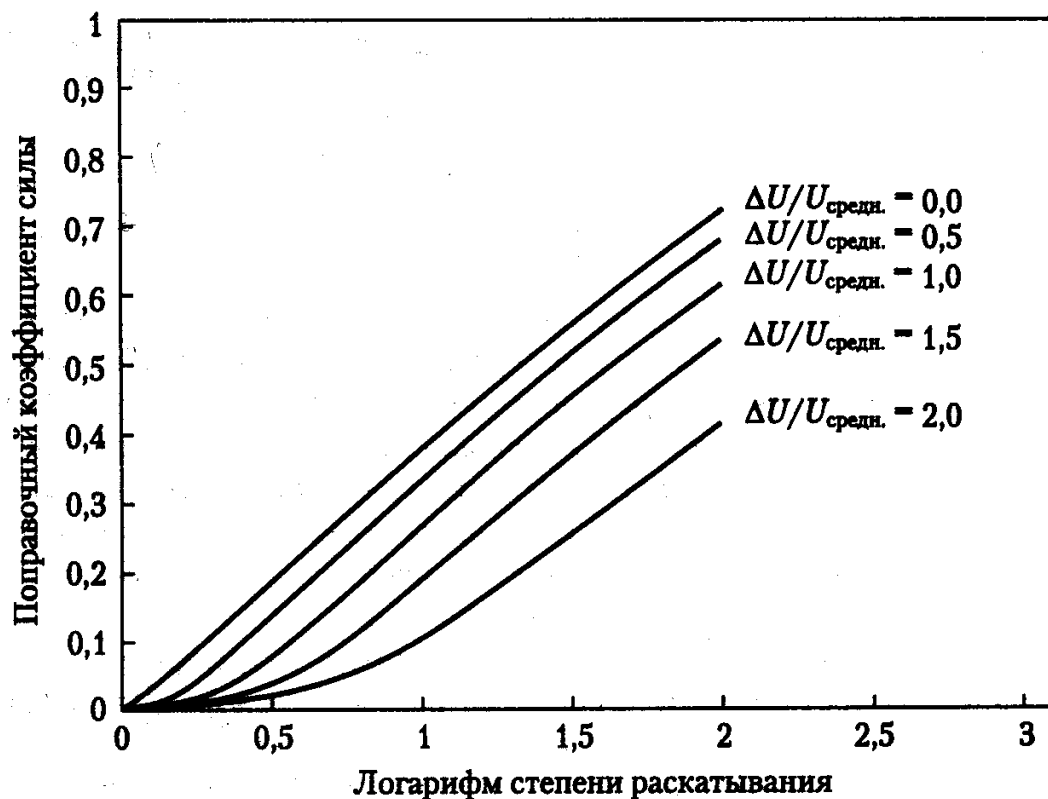


Рис. 12.46 Связь поправки силы и степени раскатывания (показатель текучести = 0,1)

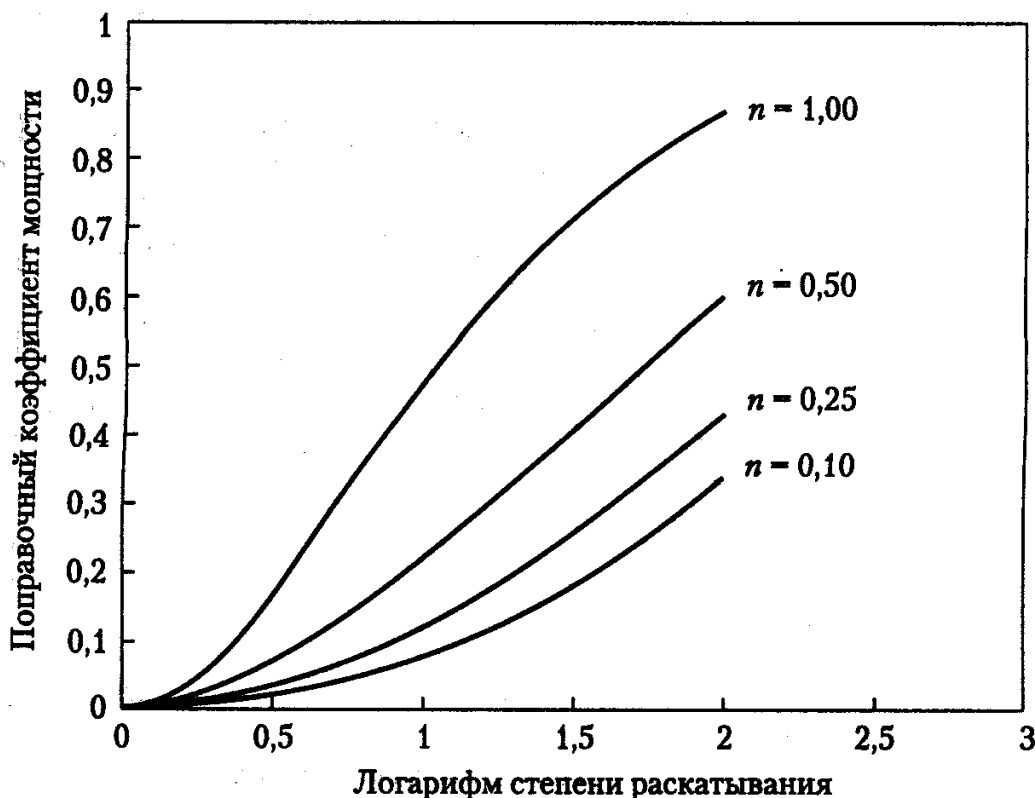


Рис. 12.47. Связь поправки мощности и степени раскатывания (при нулевой разности скоростей)

коэффициента, необходимых для применения уравнения. Максимальный коэффициент является функцией показателя текучести (см. рис. 12.38). Коэффициент запаздывания является функцией показателя текучести, степени раскатывания и разности скоростей валцов. Значение коэффициентов запаздывания приведены на рис. 12.47–12.51.

$$\frac{P}{W} = Po(n) m U^2 \left( \frac{2U}{B_0} \right)^{n-1} \sqrt{\frac{2R}{B_0}} C_w \left( rr, n, \frac{\Delta U}{U} \right). \quad (12.18)$$

Мощность, потребляемая вальцами и рассеиваемая в тесте, увеличивается со скоростью валцов, их диаметром, степенью раскатывания и уменьшением зазора. Обратите внимание на то, что влияние разности скорости валцов может быть весьма сильным. В диапазоне обычных степеней раскатывания введение разности скоростей может привести к увеличению потребления мощности примерно до 10 раз при той же средней скорости валцов. Это один из потенциальных недостатков вытяжного устройства и многовальцовых систем, которые используют значительные разности скоростей между движущимися поверхностями.

Совершаемая работа — это потребляемая мощность, поделенная на скорость подачи. Поскольку скорость подачи линейно возрастает со скоростью валцов (уравнение 12.14), а мощность возрастает в степени  $(1 + n)$  от скорости (уравнение 12.18), то совершаемая работа должна возрастать с увеличением линейной скорости. Это предполагает, что даже простое увеличение линейной скорости для увеличения производительности может влиять на качество продукта.

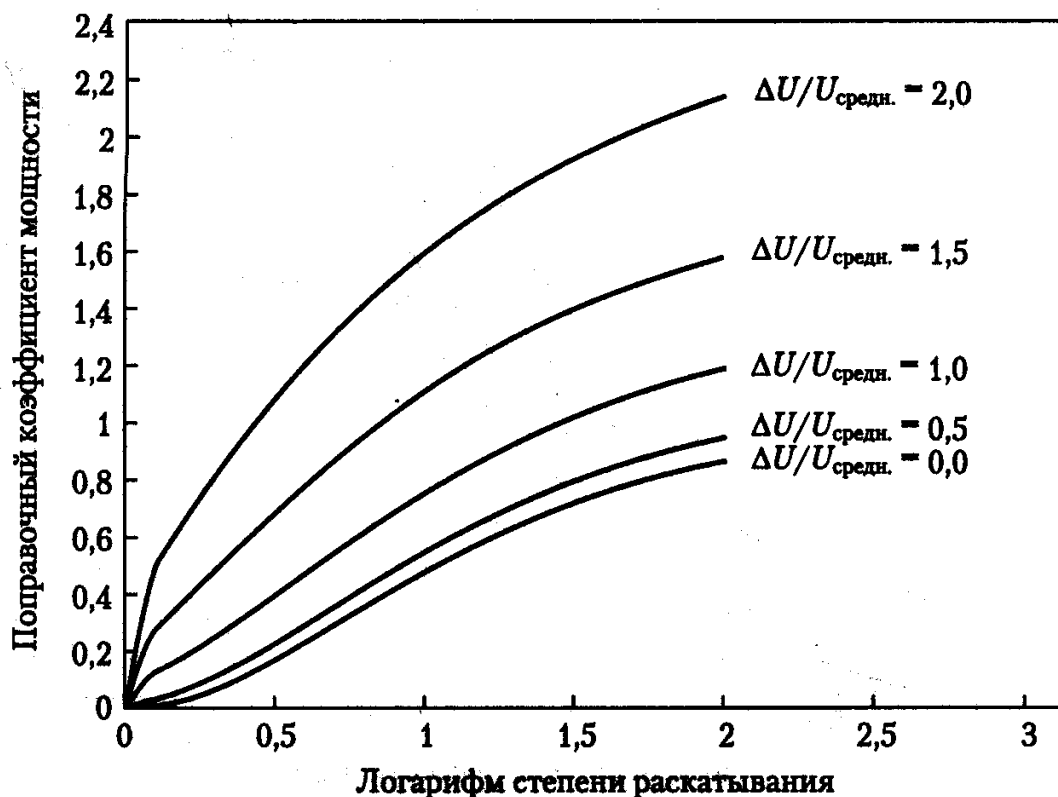


Рис. 12.48. Связь поправки мощности и степени раскатывания (показатель текучести = 1,0)

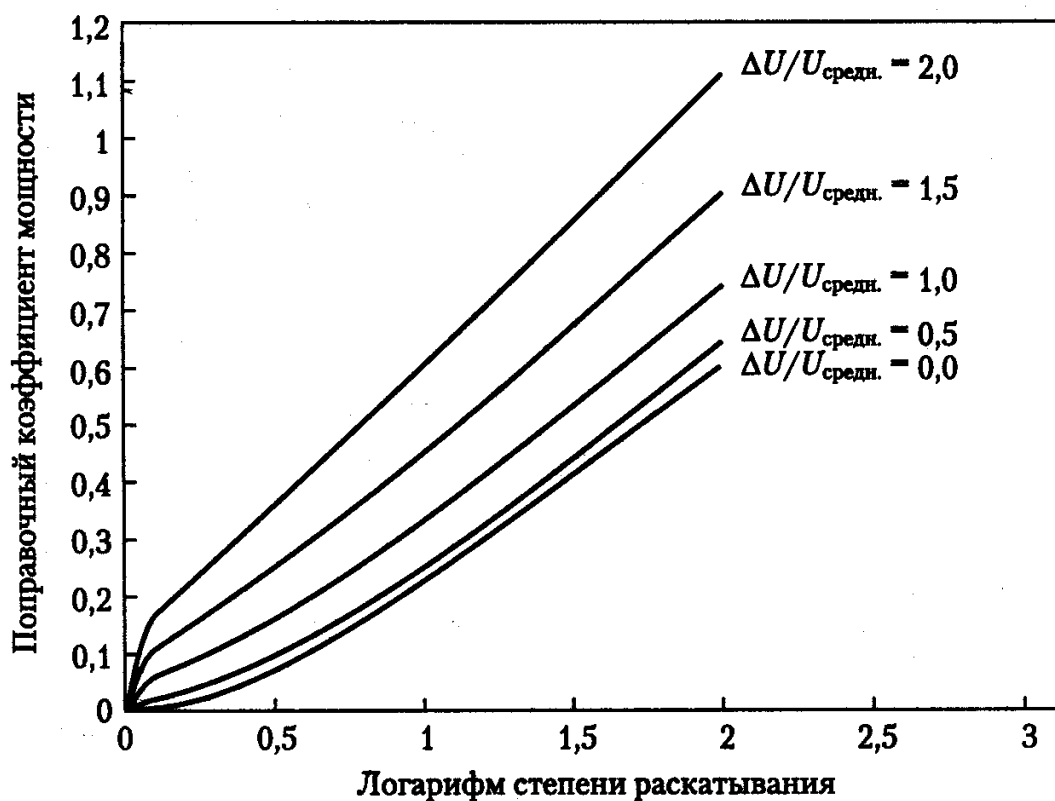


Рис. 12.49. Связь поправки мощности и степени раскатывания (показатель текучести = 0,5)

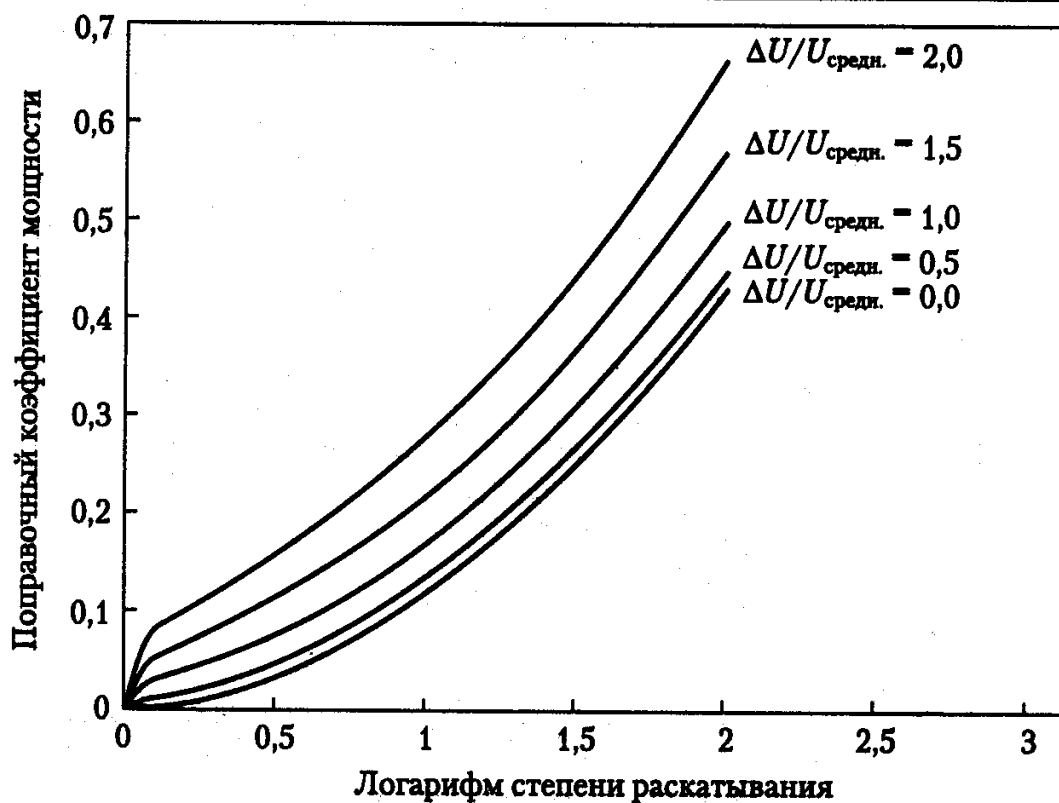


Рис. 12.50. Связь поправки давления и степени раскатывания (показатель текучести = 0,25)

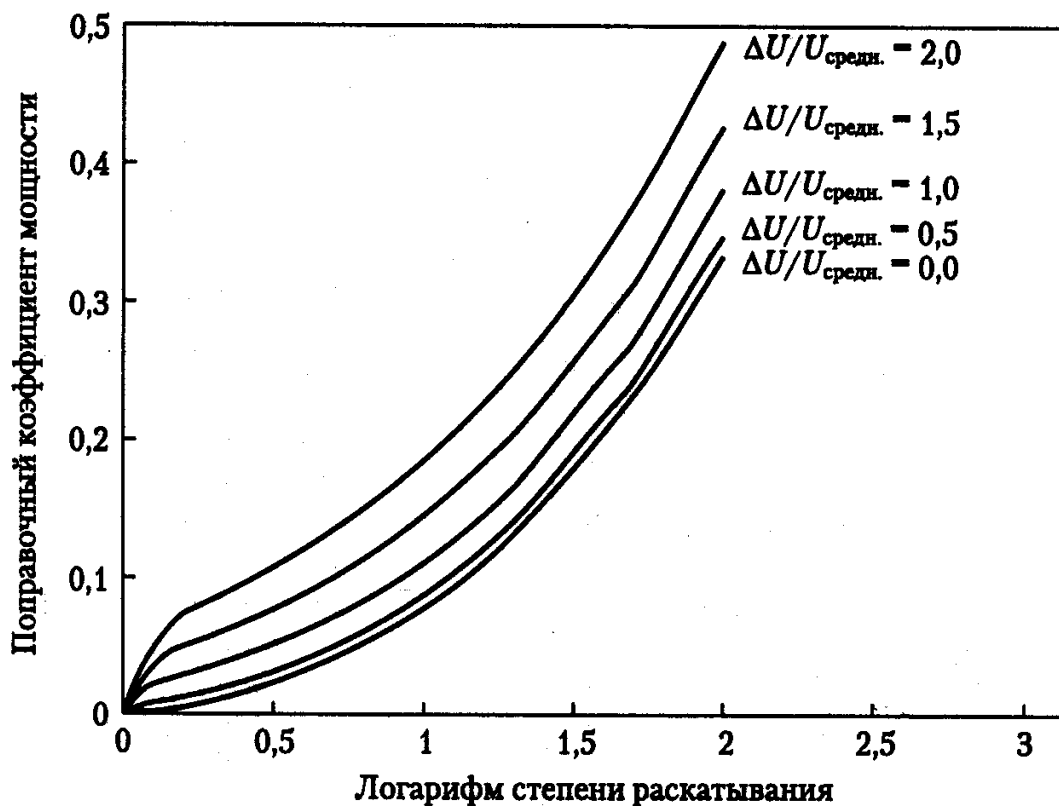


Рис. 12.51. Связь поправки мощности и степени раскатывания (показатель текучести = 0,1)

Вогнутая форма зависимостей степенных коэффициентов запаздывания (см. рис. 12.47–12.51) предполагает, что выбираемый нами путь достижения некоторого уменьшения толщины ленты (количество вальцов, профиль зазоров) определяет количество общей работы, необходимой для достижения заданного уменьшения толщины. В работе [32] демонстрируется влияние количества раскатываний, требуемых для достижения заданной степени раскатывания. Авторы принимают показатель текучести равным 0,5; профили геометрического уменьшения толщины (степени раскатывания) приводятся в табл. 12.13.

Влияние профилей раскатывания (табл. 12.13) на относительную затраченную работу и максимальное развиваемое давление приведены в табл. 12.14.

Процесс становится более «мягким» при увеличении числа раскатываний для уменьшения толщины ленты теста. Обратите внимание, что это еще одно преимущество многовальцовой или вытяжной систем над одной парой вальцов. Много роликов, по сути, создают систему, использующую множество небольших уменьшений толщины ленты. Теория предполагает, что «самый мягкий» процесс — это процесс с бесконечным количеством бесконечно малых уменьшений толщины. Такой процесс, по крайней мере теоретически, не подвергает тесто никакому давлению и никакая работа на обработку теста не затрачивается.

Теория предполагает, что независимо от того, насколько хрупко тесто, можно сконструировать систему для успешного уменьшения толщины такого теста при условии, что стоимость вальцов не играет никакой роли, но, к сожалению, это не так.

*Таблица 12.13. Профили раскатывания для систем с несколькими вальцами*

Количество раскатываний	Зазор указанной пары вальцов			
	#1	#2	#3	#4
1	2			
2	8	2		
3	13	5	2	
4	16	8	4	2

Примечание: входная толщина = 32.

*Таблица 12.14. Влияние количества раскатываний на работу и максимальное давление*

Количество раскатываний	Общая работа	Максимальное давление
1	1,00	1,00
2	0,38	0,78
3	0,14	0,62
4	0,10	0,50



**Таблица 12.15. Различные профили четырехшагового раскатывания**

Тип	Зазор указанной пары вальцов			
	#1	#2	#3	#4
Нормальный	16	8	4	2
Мягкий	12	6	3	2
Жесткий	24	12	6	2

Примечание: Входная толщина = 32.

**Таблица 12.16. Влияние типа раскатывания на работу и максимальное давление**

Тип	Общая работа	Максимальное давление
Нормальный	0,14	0,50
Мягкий	0,08	0,33
Жесткий	0,25	0,60

Другая причина для обсуждения теоретического подхода к раскатыванию теста — подготовка инженера к возникновению потенциальной проблемы.

Пекари и пищевики-технологи знают, что множество небольших уменьшений толщины теста — это хороший способ сохранения его свойств. В результате для получения наилучшего возможного лабораторного опытного образца изделия они используют реверсивную тестовальцовку и минимально возможный шаг изменения зазора для получения максимального количества раскатываний теста. Этот подход является приближением к бесконечному числу раскатываний, но он не пригоден для промышленного применения. Проблема становится явной, когда качество промышленного продукта не соответствует качеству лабораторного продукта.

Связь мощности и степени раскатывания, показанная на рис. 12.47–12.51 предполагает возможность оптимизации профиля раскатывания для заданного числа вальцов. Для четырехступенчатого раскатывания в [32] рассмотрены три разных профиля — «нормальный», «мягкий» и «жесткий». Эти профили описаны в табл. 12.15.

Для параметров, приведенных в табл. 12.15, влияние профилей раскатывания на относительную затраченную работу и максимальное развиваемое давление показано в табл. 12.16.

На основании данных табл. 12.16 можно предположить, что, вероятно, существует оптимальный профиль раскатывания для любого заданного количества вальцов. При выполнении большого раскатывания на одной паре вальцов тесто будет более «мягким», если оно толстое в начале процесса раскатывания. Наконец, можно сделать простой вывод по ежедневной работе линий. Если целевая конечная толщина теста меняется, следует перенастроить весь комплект вальцов, а не только зазор на

последней паре. К сожалению, обычно этого не делают. Объясняется это просто. Если целевая толщина возрастает и увеличивается только последний зазор, можно заменить четырехвальцовую стойку на трехвальцовую. Наоборот, если целевая толщина уменьшается, и при этом уменьшают только последний зазор, мы превращаем «мягкий» профиль раскатывания в «жесткий».

### 12.4.5 Конечная толщина теста

Из-за наличия остаточных напряжений толщина теста при отделении от вальцов, как показано на рис. 12.33–12.36, не является его фактической конечной толщиной. Конечная толщина теста всегда будет больше, чем толщина при отделении, поскольку после уменьшения напряжений (релаксации) тесто быстро увеличит свою толщину. В [28] предложено оценивать соотношение конечной толщины к зазору по следующему уравнению:

$$\frac{B_b}{B_0} = 0,06 \left( \frac{B_0}{2R} \right)^{-0,58} + 1. \quad (12.19)$$

Это уравнение вызывает сомнения, поскольку не включает никаких коэффициентов, учитывающих реологические свойства или степень раскатывания. Это частично обусловлено тем, что исследовалось только одно тесто (реологические свойства) и только в малом диапазоне степеней раскатывания. В работе [48] показано, что толщина после релаксации может значительно отличаться от предсказанной уравнением 12.19. Эта работа указывает на то, что увеличение степени раскатывания увеличивает толщину релаксированного теста, а изменение рецептуры и, предположительно, реологических свойств меняет толщину релаксированного теста. В настоящее время нет теоретической основы для предсказания толщины релаксированного теста, поэтому предсказание в лучшем случае проблематично. Опыт показывает, что толщина после релаксации в 1,5–2 раза больше зазора дает приемлемую оценку конечной толщины теста.

Конечная толщина теста может быть также изменена в ограниченном диапазоне принудительной релаксацией или растягиванием теста путем изменения скорости ленты, снимающей тесто с вальцов. Конечная толщина теста вычисляется по балансу массы:

$$B_b = \frac{UB}{U_b}. \quad (12.20)$$

Накладывание или укладка в пачку теста служит для получения слоев, принудительной релаксации или изменения ширины теста. Конечная толщина в этих ситуациях также определяется балансом масс:

$$B_b = \frac{UBW}{U_b \cdot W_b}. \quad (12.21)$$

## 12.4.6 Деформация валов и подшипников тестовальцовочных машин

Как указывалось выше, силы, стремящиеся разделить вальцы и возникающие в результате раскатывания, вызывают значительные напряжения на валах, вальцах, подшипниках и т. д. Под влиянием этих разделяющих сил вальцы могут изгибаться, что ведет к неравномерному зазору по ширине тестовальцовочного устройства. Хотя это меняет затрачиваемую работу и давление, которое тесто испытывает по ширине вальцов, этими эффектами мы пренебрежем и сосредоточимся на возникающем изменении зазора, которое проявляется в переменной толщине ленты по его ширине.

Эта проблема относится непосредственно к области сопротивления материалов. Дополнительные теоретические сведения можно найти в литературе [53].

Максимальное отклонение происходит в середине вальцов. Отклонение в этой точке можно рассчитать по формуле:

$$\delta = \frac{5FW^3}{284EI} \quad (12.22)$$

Модуль упругости  $E$  является свойством материала вальца. Для сталей обычно используют значение  $3 \times 10^9$  кПа. Момент инерции  $I$  для полого вальца вычисляется по формуле:

$$I = \frac{\pi}{4} [R^4 - (R_i)^4] \quad (12.23)$$

Оба вальца отклоняются (прогибаются), поэтому отклонение толщины теста между центром и краями вальца (в %) определяется как:

$$d = \frac{5FW^3}{384EIB_0} 100\% \quad (12.24)$$

Этот прогиб может вызвать много неожиданных проблем. Рост производительности достигается путем увеличения ширины вальцов, однако при этом прогиб значительно увеличивается. Из анализа уравнений (12.17) и (12.22) следует, что прогиб увеличивается пропорционально четвертой степени ширины вальцов. Все конструкторы понимают, прогиб может быть сведен к минимуму увеличением момента инерции вальца за счет увеличения его толщины или радиуса.

Рассмотрим валец, работающий на некоторой произвольной скорости. Предположим, прогиб равен 0,003 мм и не замечен даже при получении очень тонкой ленты теста. При увеличении ширины вальцов в пять раз для увеличения в пять раз производительности прогиб более широкого вальца составил бы около 1,88 мм, что было бы явно заметно при раскатывании тонких изделий, таких как тортильяс. Такой про-

гиб можно преодолеть увеличением диаметра вальцов. Если диаметр вальцов увеличить в четыре раза, развиваемая сила также увеличится в четыре раза (см. уравнение 12.17), но жесткость возрастет в 256 раз (см. уравнение 12.23). В результате прогиб составил бы 0,03 мм, что больше отклонения, наблюдаемого при меньшем диаметре и более узких вальцах, но это все равно незначительно по сравнению с толщиной ленты.

Увеличив диаметр вальца для коррекции, конструктор создает проблему, которая обнаруживается при рассмотрении влияния диаметра вальца на максимальное развиваемое давление и мощность. Для анализа можно использовать уравнения (12.16) и (12.18). Большой диаметр вальцов приведет к максимальному давлению и затрачиваемой работе в два раза больше, чем при исходном меньшем диаметре вальцов. С учетом рассмотренного выше влияния этих переменных на качество продукта неудивительно, что изделия, получаемые на системе с большим диаметром вальцов, будут отличаться от полученных на системе с меньшим диаметром вальцов.

Разделяющие силы также воздействуют на подшипники и валы. Отклонение валов характеризует следующая формула:

$$\delta = \frac{FL^3}{6EI}. \quad (12.25)$$

Момент инерции валов вычисляется по формуле:

$$I = \frac{\pi}{4} \cdot R^4. \quad (12.26)$$

Длина вала оценивается как расстояние от центра подшипника до стороны раскатывающих вальцов. Уравнение (12.25) ясно указывает, что это расстояние следует сделать минимальным, помещая подшипники как можно ближе к вальцам.

Отклонение валов не вызывает отклонение веса по ширине вальцов, но может вызвать проблему регулирования веса. В плохо сконструированных системах отклонение валов может быть довольно большим, что мешает получению ленты нужной толщины, поскольку отклонение может превысить целевой зазор. Другая причина, по которой отклонение валов может вызвать проблемы с регулированием веса, связана с тем, что реологические свойства теста меняются от замеса к замесу в результате отклонений в рецептуре или изменений источника сырья. Это ведет к изменению сил деления и далее — к изменениям отклонения валов и толщины продукта.

## 12.4.7 Вопросы масштабирования

Проблемы масштабирования, связанные с системами вальцевания, уже упоминались. Уравнения (12.16) и (12.18) и данные табл. 12.17 демонстрируют влияние диаметра вальцов на развиваемое давление и затрачиваемую работу при постоянной скорости вальцов.

**Таблица 12.17. Влияние диаметра вальцов на относительную затрачиваемую работу и давление**

<b>Диаметр вальцов, дюйм</b>	<b>Относительная работа или давление</b>
3	1
6	1,4
9	1,7
12	2

**Таблица 12.18. Влияние скорости вальцов на относительную мощность**

<b>Скорость вальцов, м/мин</b>	<b>Относительная работа или давление</b>
5	1
10	1,4
15	1,7
20	2

Так как диаметр вальцов лабораторной тестовальцовки может быть равен трем дюймам и менее, увеличение диаметра вальцов на качество изделия может быть значительным.

Проблема дополнительно обостряется тем, что лабораторные вальцы обычно движутся медленнее вальцов промышленной установки. В табл. 12.18 показано влияние скорости вальцов на относительное развитие давления и затрачиваемую работу, предполагая, что тесто имеет показатель текучести 0,5.

Если учесть влияние увеличения скорости и диаметра при масштабировании, а также стремление пекарей в лаборатории использовать «бесконечное» число раскатываний, действие масштабирования на качество продукта может быть весьма и весьма значительным.

Что должно быть сделано для исключения такой потенциально опасной ситуации? Одно из решений, которое, к сожалению, обычно невозможно реализовать, — утвердить рецептуру или изделие для полномасштабного выпуска только после испытаний в полном масштабе.

Более практичный подход заключается в выполнении следующих проверок:

- Настоять на том, чтобы пекарь в лаборатории не использовал «бесконечное» число раскатываний. Это само по себе не достаточно для обеспечения успеха.
- Проверить влияние увеличения затраченной работы путем повторного раскатывания теста достаточное число раз для моделирования затраченной работы на полномасштабной промышленной установке. К сожалению, это не создаст тех же максимальных давлений, которые будут наблюдаться при полномасштабном процессе.
- Работать на опытной установке в течение коротких периодов времени на скоростях, которые создадут развиваемое давление и затраченную работу, харак-

терные для полномасштабного производства. Успешное выполнение такой проверки может дать достаточную уверенность в успехе полномасштабного производства. Неудовлетворительный результат укажет на необходимость изменения рецептуры изделия для увеличения его устойчивости к раскатыванию.

- Построить опытную установку с диаметром вальцов как у промышленной установки и работать на ней со скоростями полномасштабной установки. На опытной установке можно получить приемлемые производительности, делая вальцы опытной установки значительно уже, чем вальцы промышленной. К сожалению, этот наилучший подход может быть нереализуем. Стоимость такой опытной тестовальцующей установки будет приближаться к стоимости полномасштабной системы. Даже если стоимость опытной установки не служит препятствием, существует несколько других проблем при таком подходе. Если изделие велико, например, основа для пиццы, минимальная ширина опытной установки потребует неприемлемо высокой производительности (скорости). Наконец, работа на опытной установке при высоких линейных скоростях может вызвать значительные сложности с подачей на такую тестовальцующую установку или подачу с нее далее. Например, если вся продукция опытной тестовальцующей установки подается в непрерывно работающую печь, то длина опытной печи должна равняться длине полномасштабной печи. Таким образом, может оказаться необходимым не использовать большую часть продукта, чтобы решить эти побочные вопросы масштабирования.

## Перечень обозначений

$A$	площадь рубашки
$B$	зазор при отделении
$B_b$	толщина после релаксации
$B_0$	зазор
$C_f$	коэффициент поправки силы для ограниченной подачи ленты на вальцы с равной скоростью (уравнение 12.17)
$C_p$	коэффициент поправки давления для ограниченной подачи ленты на вальцы с равной скоростью (уравнение 12.16)
$C_p$	теплоемкость
$C_w$	коэффициент поправки мощности для ограниченной подачи ленты на вальцы с равной скоростью (уравнение 12.18)
$d$	отклонение веса в процентах
$E$	модуль упругости вальца
$E_m$	затрачиваемая входная энергия на единицу массы
$F$	разделяющая сила
$F(n)$	коэффициент показателя текучести для расчета силы (рис. 12.38)
$I$	момент инерции валец/вал
$m$	степенная консистенция
$M$	масса теста
$M_i$	масса компонента
$n$	степенной показатель текучести

$P_{\max}$	максимальное давление, развиваемое между вальцами
$P$	мощность
$P(n)$	фактор показателя текучести для расчета давления (рис. 12.38)
$P_0(n)$	фактор показателя текучести (рис. 12.38)
$Q$	объемный поток
$Q_j$	тепло, переданное через рубашку
$R$	радиус вальца
$R_i$	внутренний радиус вальца
$\pi$	степень раскатывания, отношение толщины теста на входе к зазору
$t$	время замешивания
$U$	средняя скорость вальцов
$u$	общий коэффициент теплопередачи
$U_b$	скорость ленты теста после релаксации/накладывания
$W$	ширина вальца
$W_b$	ширина ленты теста после релаксации/накладывания
$v$	скорость
$y$	направление, перпендикулярное потоку
$\delta$	отклонение валец/вал
$\Delta h_i$	изменение энтальпии компонента
$\Delta h_w$	теплота замачивания муки
$\Delta T_{LM}$	логарифмическая средняя разность температур
$\Delta U$	разница скоростей вальцов
$\tau$	напряжение при сдвиге

## Литература

1. Andrews, G., Copeland, J., Fairburn, N., French, F., and Zielsdorf, R. High speed dough mixing and mixers // Am. Inst. Baking Tech. Bull. — 1989. — № XI(12).
2. TBX-2500 mixer and SBX stationary bowl mixers. — Goldsboro, North California: APV Baker.
3. Tweedy Mixing Systems: Catalogue #3/95/BP/384/385/386. — Peterborough, England: APV Baker.
4. Bloksma, A. H. and Bushuk, W. Rheology and chemistry of dough // Wheat Chemistry and Technology. — Vol. 2 // Pomeranz, Y. (ed.). — St. Paul, MN: American Association of Cereal Chemists, 1988.
5. Brazinsky, I., Cosway, H. F., Valle, C. F., Clakr Jones, R., and Story, V. A theoretical study of liquid-film spread heights in the calendering of Newtonian and power law fluids // J. Appl. Polym. Sci. — 1970. — № 2. — P. 2771–2784.
6. Bushuk, W., Kilborn, R. H., and Irvine, G. N. Studies on continuous-type bread using a laboratory mixer // Cereal Sci. Today. — 1965. — № 10(5). — P. 402–405.
7. «Duo-Flex» Universal Double Arm Mixers: Brochure #5a. — Joilet, Illinois: Champion Machinery Co., 1994.
8. Spiral Dough Mixers: Brochure #5d. — Joilet, Illinois: Champion Machinery Co, 1994.

# 13 ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ОЦЕНКИ ЗАТРАТ

*Дж. Питер Кларк*

*Перевод В. Ашкинази под ред. к. т. н., доцента Филипповича Е. Ю.*

## Содержание

- 13.1 Введение
- 13.2 Производственное предприятие
- 13.3 Оценка капитальных затрат
  - 13.3.1 Компоненты пищевого оборудования, учитываемые при предварительной оценке
    - 13.3.1.1 Оборудование для приема и хранения сырья
    - 13.3.1.2 Оборудование для приема и хранения упаковочных материалов
    - 13.3.1.3 Собственно технологическое оборудование и помещения для него
    - 13.3.1.4 Оборудование для подготовки материалов и работы с ними
    - 13.3.1.5 Упаковка и упаковочное оборудование
    - 13.3.1.6 Оборудование для подвода энергоносителей и других сред
    - 13.3.1.7 Оборудование для охраны окружающей среды
    - 13.3.1.8 Здания и сооружения
    - 13.3.1.9 Оплата инженерных и строительных работ сторонних организаций
    - 13.3.1.10 Затраты на неопределенность
  - 13.3.2 Методики оценки отдельных статей сметы
    - 13.3.2.1 Оценка на основе твердых расценок поставщиков и подрядчиков
    - 13.3.2.2 Расчеты потребности в материальных и трудовых ресурсах с оценкой в человеко-часах и издержки производства на единицу продукции
    - 13.3.2.3 Оценка издержек с помощью коэффициента на основное оборудование и с учетом корреляций
    - 13.3.2.4 Оценка издержек на единицу площади (кв. фут) исходя из имеющегося опыта
    - 13.3.2.5 Оценки, основанные на объемах продаж или производства
  - 13.3.3 Рекомендуемый подход к оценке капитальных затрат
    - 13.3.3.1 Определение того, что будет входить в оценку
    - 13.3.3.2 Подготовка блок-схем
    - 13.3.3.3 Подготовка схемы строительства
    - 13.3.3.4 Определение перечня оборудования
    - 13.3.3.5 Подготовка предварительной оценки



- 13.4 Оценка эксплуатационных затрат
- 13.5 Сравнение вариантов
- 13.6 Корректировка оценок во времени
- 13.7 Риски и неопределенность
- 13.8 Заключение

Дополнительная информация

Литература

Приложения

Приложение 13.1 Основная необходимая информация

Приложение 13.2 Сводка данные о затратах для пищевых установок

## 13.1 Введение

Оценка капитальных затрат и эксплуатационных расходов, а также их влияния на рентабельность — это, вероятно, одна из наиболее часто решаемых инженером-пищевиком задач, но зачастую это делается без достаточного учета конкретных условий. Цель этой главы — дать практические рекомендации и изложить существующие методы, а также обсудить конкретные условия таких оценок и расчетов.

Большая часть существующей литературы по инженерной экономике (некоторые ссылки даны ниже) посвящена преимущественно сложным методам оценки и сравнения альтернативных вариантов. В других источниках, особенно посвященных конструированию химических установок, приводятся методы оценки капитальных затрат на химические и нефтехимические установки, а по оценке экономической стороны пищевых установок материалов опубликовано довольно мало. С химическими аппаратами у пищевых установок общего не очень много, хотя там, где возможно обобщение, мы его приводим. Обычно данные для каждой ситуации должны определяться отдельно.

Одна из основных задач этой главы — помочь инженеру-пищевiku на производстве понять, как данный проект будет оценен финансистами предприятия, чтобы инженер мог предвидеть, какая именно информация им необходима. Другая задача — представить конкретные данные, которые могут помочь в подготовке предварительных оценок.

## 13.2 Производственное предприятие

Любая фирма, частная или государственная, стремится выжить. Иными словами, предприятие должно приносить достаточный доход, чтобы своевременно платить по обязательствам, ведь в противном случае деятельность фирмы будет прекращена, а ее имущество распродано. Наиболее распространенный способ получения дохода — это продажа товаров или услуг по ценам, превышающим их стоимость. К другим источникам финансовых поступлений относятся кредиты, продажа акций и активов (рис. 13.1).

К расходам относят прямые издержки<sup>1</sup>, заработную плату персонала, выплату процентов по кредиту, налоги, аренду и т. п. Разница между выручкой от продаж и

<sup>1</sup> Затраты на основное сырье, вспомогательные материалы, функционально-технологические добавки, энергоносители и т. д. — *прим. науч. ред.*



Рис. 13.1. Движение денежных средств на предприятии

затратами — это прибыль, часть которой может делиться между владельцами (акционерами) как дивиденды, а остаток повторно инвестируется в развитие предприятия.

Обычно для производства товаров и услуг требуются активы в какой-то форме, зависящей от рода деятельности предприятия. К активам относят основные фонды предприятия, оптовую базу, грузовой парк автомобилей, запас сезонного сырья и готовых изделий, средства на банковском счете и интеллектуальную собственность — например, патенты и торговые марки. После учреждения фирмы для приобретения первоначальных активов нужны некоторые капиталовложения еще до того, как они начнут приносить результаты. При работе предприятия материальные ресурсы изнашиваются и нуждаются в замене<sup>1</sup>. Если предприятие собирается развиваться (а это свойственно большинству фирм), необходимы дополнительные активы. Средства на эксплуатационные расходы и развитие получают (при наличии возможности) из нераспределенной прибыли (нераспределенной владельцам) или, при необходимости, из других источников, включая кредиты и дополнительную эмиссию акций (или продажу права собственности).

<sup>1</sup> Замена оборудования на пищевом предприятии происходит в основном либо с целью замены на более высокотехнологичное, либо в целях уменьшения технологических потерь для увеличения коэффициентов выхода готовой продукции. — Прим. науч. ред.

Финансовая структура современных корпораций может быть очень сложной, но их суть вышеприведенная простая модель описывает достаточно верно. Чтобы начать дело, необходимы деньги, и инвесторы ожидают получения прибылей. Прибыли могут быть в форме доходов от дивидендов и/или от увеличения стоимости основных фондов, зачастую выражаемой как стоимость доли акционерного капитала. Таким образом, следующая (после обеспечения стабильности) важная задача любого предприятия — это увеличение капитализации.

Капитализация может отражаться в рыночной цене акций, в расчетной остаточной стоимости основного капитала или в объемах оборота (в зависимости от предприятия и структуры его собственности). Теоретически биржевой курс акций отражает текущую стоимость будущих доходов владельцев акций, часто оцениваемую как доходность одной акции. На практике на текущую цену влияют спрос и предложение, мнения о состоянии экономики той или иной страны и оценки потенциальных изменений будущих доходов данной фирмы.

Фирмы, которые считаются способными к быстрому росту, зачастую ценятся выше, чем те, которые считаются более стабильными. Растущие компании обычно достигают своих результатов путем сохранения большей части прибылей — иногда вообще не выплачивая дивиденды, беря относительно большие кредиты (и приобретая активы быстрее, чем им позволила бы лишь собственная прибыль), работая в относительно новых областях (например, в области информационных технологий) или на менее известных и, следовательно, менее надежных рынках.

Более стабильные корпорации (такие, как большинство крупных пищевых компаний), имеют акции, по которым обычно выплачиваются дивиденды, представляющие разумный баланс между задолженностью и активами, с одной стороны, и прогнозируемыми доходами, с другой. Все это учитывается в биржевых котировках, которые в этом случае постоянно и надежно растут (но не очень быстро). В конечном итоге мы заботимся об оценке капитальных и эксплуатационных затрат для того, чтобы распределить имеющиеся финансовые ресурсы для роста капитализации фирмы — независимо от того, как именно это будет происходить.

Финансы — это своего рода «кровеносная система» бизнеса, и без них не обеспечить стабильности предприятия и роста его капитализации. Именно поэтому большинство финансовых методов анализа строятся на учете их влияния на инвестиции. Финансы в этом смысле — это чистый доход фирмы после уплаты налогов, то есть разность между полученной от продаж выручкой и средствами, затраченными на покрытие текущих расходов и выплату налогов. Финансовые средства, полученные в кредит — это не прибыль, а средства, выплаченные за активы, — не затраты. Эти сделки лишь делают возможным получение средства, но непосредственно не участвуют в обороте. При оценке какого-либо проекта с точки зрения капиталовложений имеется одно исключение — выплаченные деньги включают в расчет чистой стоимости для сравнения.

Итак, движение денежных средств («оборот») — это наиболее важный элемент «здоровья» предприятия, и поэтому все рассматриваемые в этой главе методы включают оценку оборотов и их сравнение. Превышение финансовых поступлений фирмы над платежами позволяет ей выживать и увеличивать капитализацию. Для достижения превышения финансовых поступлений фирмы над платежами или

во избежание обратной ситуации (превышения платежей над финансовыми поступлениями) делаются инвестиции, а оценка капитальных и эксплуатационных затрат производится для того, чтобы выбрать наилучшие их варианты (а это, как мы покажем ниже, те, что обеспечивают со временем максимальный оборот).

### 13.3 Оценка капитальных затрат

Для пищевых предприятий оценка капитальных затрат — это не точная наука, а искусство. Ниже мы рассмотрим некоторые методы, которые могут быть использованы при отсутствии точных данных, и, опираясь на некоторые источники, дадим некоторые правила «проверки разумности оценки».

Существует много систем распределения затрат на осуществление проекта (составления сметы), большинство которых разработано для удобства подрядчиков и строителей. Поскольку эти системы широко используются в инжиниринговых и строительных фирмах, по строительной части проектов пищевых установок существует более или менее детальная информация, но строительная часть составляет в проекте редко когда больше 30–40% общих затрат, а остальное, как видно из табл. 13.1, — это технологическое оборудование, монтаж, инжиниринг и другие затраты. В табл. 13.2 приведены примерные затраты на строительную часть пищевых установок в соответствии со стандартными нормами в долларах США на квадратный фут площади (данные на конец 1980-х гг.). Методы корректировки затрат с учетом времени и места рассмотрим ниже.

В приложении 13.1 приведен перечень сведений, необходимых для проектирования пищевого оборудования. Вначале, как правило, большинство их неизвестно, и зачастую перед принятием некоторых решений необходимо провести довольно сложные расчеты (так как эти решения могут существенно влиять на общий объем затрат). Тем не менее существует общий подход к конструированию пищевого технологического оборудования, позволяющий еще на ранних стадиях определить наиболее критические моменты и оценить их реализуемость.

Таблица 13.1. Распределение затрат (%) на примере нескольких пищевых установок

Категория	Установки		
	А	В	С
Площадка	3,5	4,1	2,2
Здание	25	30,8	29,8
Технологическое оборудование	33,1	20,8	37,8
Монтаж	23,7	31,1	21,4
Прочее	2,5	2,8	2,4
Инжиниринг	12,1	10,4	6,4
<b>Итого:</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

**Примечание:** Затраты по отдельным позициям даны в виде процентов от суммарных затрат. Установки: А — крупная установка по выпуску корма для домашних животных (1991); В — установка среднего размера по выпуску пищевых ингредиентов (1992); С — крупная установка по производству мороженого (1989).

Таблица 13.2. Затраты (\$ на 1 кв. фут) на строительную часть пищевых установок

	Установка		
	А	В	С
Подготовка стройплощадки	5,98	13,33	9,80
Бетонные работы	17,40	6,44	37,03
Кирпичная кладка	1,33	1,60	0,94
Металлоконструкции	24,98	11,27	4,35
Деревянные конструкции	0,15	0,42	0,64
Влагозащита	4,71	7,38	2,65
Двери, окна	7,23	2,77	2,39
Отделочные работы	1,66	3,73	3,39
Специальные работы	0,35	0,20	0,28
Строительное оборудование	0,55	0,89	3,58
Оснастка	0,01	0,00	0,00
Специальное строительство	16,14	3,66	1,19
Транспортировка стройматериалов	0,93	0,00	1,17
Механические работы	24,15	32,83	19,33
Электромонтажные работы	11,32	19,82	10,90
<b>Итого:</b>	<b>116,89</b>	<b>104,35</b>	<b>97,65</b>

**Примечание:** Затраты приведены в долларах США на кв. фут. Установки: А — крупная установка по получению сухих завтраков из злаков (1990); В — крупная установка для производства корма для домашних животных (1989); С — крупная установка по получению сухих завтраков из злаков (1989).

### 13.3.1 Компоненты пищевого оборудования, учитываемые при предварительной оценке

Типичные компоненты пищевого оборудования перечислены ниже (см. разделы 13.3.1.1–13.3.1.10), и при оценке капитальных и эксплуатационных затрат они могут служить своего рода технологической картой. В каждом случае к ним следует добавить конкретные данные по соответствующей технологии и упаковке, а затем просуммировать затраты по каждому компоненту.

#### 13.3.1.1 Оборудование для приема и хранения сырья

Сырье зачастую является сезонным, скоропортящимся, с различными свойствами, оно бывает загрязнено почвой и микроорганизмами. Все эти неотъемлемые свойства пищевого сырья отличают его от сырья других предприятий, влияя на затраты на соответствующее оборудование по его приему и хранению.

#### 13.3.1.2 Оборудование для приема и хранения упаковочных материалов

Упаковка, включая такую тару, как банки и бутылки, может изготавливаться на месте или закупаться «на стороне». В любом случае упаковочные материалы должны приниматься, храниться (иногда в регулируемой атмосфере) и доставляться к месту использования в требуемом виде, что также сказывается на затратной части соответствующего оборудования.

### 13.3.1.3 Собственно технологическое оборудование и помещения для него<sup>1</sup>

Каждый технологический пищевой процесс уникален, но многие из них имеют общие элементы: смешивание, формование, тепловую обработку и консервирование. Твердые вещества смешивают с твердыми и с жидкими, смешивают и жидкости с жидкостями. Пищевые продукты обычно по своим физическим свойствам являются неньютоновскими (вязкоэластичными) жидкостями, зачастую они вязкие и клейкие, могут быть чувствительны к усилию сдвига. При формировании может использоваться дозирование по массе или объему, экструзия, прессование, нарезание в виде кубиков, ломтиков, слоение, литье или другие специальные операции. При тепловой обработке для изменения вкуса, содержания воды, цвета и текстуры обычно используют непосредственный или косвенный нагрев. И, наконец, консервирование может включать нагревание перед упаковкой или после нее, замораживание, охлаждение, химическую стерилизацию или облучение.

### 13.3.1.4 Оборудование для подготовки материалов и работы с ними

Значительная часть затрат на большинстве пищевых предприятий приходится на операции со вспомогательными материалами. Поскольку они происходят на разных установках, то могут существенно влиять на свойства материалов. Например, многие твердые пищевые ингредиенты являются хрупкими и при пневмотранспортировке или передаче с одного ленточного конвейера на другой они могут сломаться. Для многих сыпучих твердых веществ (муки, сахара, соли и злаковых зерновых) используется пневмотранспорт. Перемещение на конвейере плотных веществ происходит более аккуратно и позволяет транспортировать сахар без образования пыли. В пищевой промышленности распространены ленточные конвейеры, но в них следует применять материалы, которые легко мыть. Более сложные механические устройства для транспортировки некоторых липких и пастообразных материалов (например, фарша и полуфабрикатов для кексов и пудингов) — это винтовые и скребковые конвейеры.

### 13.3.1.5 Упаковка и упаковочное оборудование

Многие пищевые продукты продаются в относительно небольших потребительских упаковках и поэтому должны отпускаться по нормированной массе или объему. К первичной упаковке<sup>2</sup> относят пакеты, консервные банки, бутылки, бумагу и пленку, к элементам вторичной — укупорочные средства (крышки, пробки) для тары, этикетки и картонные коробки. «Третичная» упаковка — это ящики, бумага для оборачивания пачек и лотки. И, наконец, для удобства сбыта большую часть «третичных» упаковок штабелируют на деревянных или пластмассовых поддонах и обертывают в термоусадочную пленку или иной растягивающийся материал.

### 13.3.1.6 Оборудование для подвода энергоносителей и других сред

На пищевых предприятиях используются все обычные на производстве энергоносители, но некоторые из них заслуживают особого внимания, в частности электроэнергия, пар, вода (питьевая), сжатый воздух и топливо (чаще всего — природный газ).

<sup>1</sup> Для предприятий мясной переработки необходимы специально подготовленные технологические помещения (например, для созревания сырья и выдержки готовой продукции), в которых трудно выделить общие элементы, так как не происходит видимых физико-химических или механических процессов.

<sup>2</sup> Основная мелкотарная первичная потребительская упаковка — вакуумная, позволяющая значительно увеличить сроки хранения фасованной продукции.

В пищевых установках широко применяются относительно редкие на других производствах вакуум, холод и дезинфицирующие средства. Вакуумные системы часто используются для сухой очистки растительного сырья, и в них собирается пыль. Если вакуумная система неправильно спроектирована, в этой пыли могут скапливаться насекомые, и, кроме того, она может быть взрывоопасна. Вакуум также используется для пневмотранспортировки сыпучих пищевых материалов. Кроме того, в вакууме проводится первичная подготовка мясного сырья, например для деликатесных ассортиментных групп.

В пищевых технологиях широко применяется охлаждение, которое может быть основано на применении аммиака, фреонов (фторуглеродистых соединений) или других хладагентов. При выборе хладагента решающими являются затраты, экономичность и простота обслуживания и ремонта. В настоящее время проблема усложнилась из-за официального запрещения применения некоторых привычных хладагентов вследствие их вреда для озонового слоя. Хороших заменителей для давно используемых фреонов мало, а существующие дороги и в достаточной степени не проверены. В большинстве новых установок, требующих для охлаждения, замораживания и холодного хранения значительной холодопроизводительности, будут, вероятно, использованы системы, основанные на аммиаке<sup>1</sup>.

И, наконец, большинство пищевых технологических установок имеет централизованные системы безразборной мойки (CIP), в которых разбавленная щелочь или кислота, моющее средство и дезинфицирующие растворы подаются к местам использования и возвращаются к резервуарам-хранилищам. Концентрированные очищающие вещества хранят в специальных резервуарах, изготовленных зачастую из стекловолокна (поскольку эти вещества могут быть агрессивными) и размещаемых в специальных помещениях, оборудованных аварийной сигнализацией и специальными стоками. Разбавление растворов производят в резервуарах из нержавеющей стали, где при необходимости осуществляется подогрев и циркуляция раствора.

#### 13.3.1.7 Оборудование для охраны окружающей среды

На пищевых предприятиях образуются относительно большие количества жидких и твердых отходов, которые обычно являются биodeградирующими (разлагаемыми микроорганизмами), но многие могут быть весьма устойчивыми и для их устранения требуются специальные меры. Например, многие пищевые отходы полезны как корм для животных, поэтому они могут быть переданы или проданы местным сельхозпредприятиям (фермерам), что требует безопасных и соответствующих санитарным требованиям хранилищ<sup>2</sup>. Жидкие отходы почти всегда превышают ПДК по содержанию жиров, масел и смазок, установленные водоохранными органами (часто ПДК составляет до 100 мг/л), и поэтому пищевая установка, как минимум, должна быть оснащена жиросборником или флотационной системой. Уровни биологической потребности в кислороде (БПК) также почти всегда превышают «ожидаемые» уровни, которые обычно

<sup>1</sup> При использовании аммиака в качестве хладагента необходимо всегда предусматривать опасность порчи хранимого сырья и продукта в случае аммиачной утечки, из-за взаимодействия аммиака с поверхностной влагой хранимого сырья и продукта. — *Прим. науч. ред.*

<sup>2</sup> К сожалению, на российских пищевых предприятиях технологические и пищевые отходы смешиваются в технологических циклах и для их разделения требуются затраты, сопоставимые с затратами на полный цикл очистных мероприятий.

основаны на средних уровнях для коммунально-бытовых сточных вод (около 200 мг/л). Тем не менее пищевые отходы обычно легко обработать, и поэтому за дополнительную плату большинство пищевых предприятий могут организовать надлежащее удаление своих жидких отходов. В этом случае для расчета затрат должны контролироваться объемы стоков и их концентрации, а производство должно быть спроектировано и эксплуатироваться так, чтобы минимизировать образование жидких отходов.

Хотя контроль выбросов в атмосферу для пищевых предприятий до сих пор не был серьезной проблемой, поскольку объемы и концентрации газообразных загрязнений на порядок ниже соответствующих величин жидких отходов, он становится все более необходимым. В качестве примера можно привести стандарт на содержание летучего органического углерода (ЛОУ), введенный во многих отраслях американской промышленности федеральным законом о контроле над загрязнением воздуха. Согласно данному закону, хлебобулочные предприятия должны озонять дымовые газы из-за наличия в них этанола, образованного при брожении теста для хлебобулочных изделий и печенья. Было обнаружено, что в некоторых зонах требуется особый контроль запахов, возникающих при обжаривании зерен кофе и какао-бобов. Эти вопросы необходимо учитывать, так как это будет способствовать получению более всесторонних и полных предварительных оценок сметы — пренебрежение одной-двумя такими статьями затрат на раннем этапе может привести к весьма неприятным сюрпризам впоследствии.

#### 13.3.1.8 Здания и сооружения

Пищевое производство может потребовать строительства нового, расширения (или перестройки) существующего здания, а также некоторого сочетания этих работ. Перестройка зданий может таить в себе много неожиданностей, и поэтому ее трудно оценить достаточно точно. Затраты на строительство могут включать:

- затраты на разборку/снос (составляющая подготовки площадки);
- поправку на специальные условия строительства (это особенно относится к работам по расширению или перестройке существующих зданий);
- затраты на основные строительные работы (полы, стены, потолки, опорные конструкции, изоляция);
- затраты на отопление, вентиляцию и кондиционирование воздуха, обычно включающие затраты на охлаждение, освещение, электроснабжение, санитарно-технические работы, пожарную защиту и на получение соответствующих разрешений (получение разрешений на производство тех или иных работ может оказаться весьма длительным процессом).

#### 13.3.1.9 Оплата инженерных и строительных работ сторонних организаций

В смету должна быть включена некоторая поправка на оплату этих работ, даже если считается, что они уже включены в общую сумму или другие статьи. Существуют расходы собственника по его собственным инженерным работам и надзору, надлежащим образом включенным в проект для учета и налогообложения. Этот вопрос мы рассмотрим ниже. Сторонние инженеринговые и строительные фирмы назначают плату в соответствии с теми или иными договорными условиями, но в целях оценки сметы обычно принимают стоимость проектирования около 10%, а строительства — 3–5%.



### **13.3.1.10 Затраты на неопределенность**

Неопределенность — это спорная проблема в оценке затрат. Частично она заключается в различном понимании самого термина «неопределенность». В данной главе под неопределенностью понимается особая статья в смете расходов для отнесения ошибок в определении других элементов оценки. Эта статья отражает точность оценки, которая обычно зависит от вложенных в разработку усилий, выделенного времени и имеющихся данных.

Неопределенность в оценке или в смете затрат не предназначена для покрытия изменений в объеме, учета «форс-мажора» или других чрезвычайных обстоятельств — например, нарушение обязательств поставщиком. Поскольку такие случаи время от времени возникают, руководители проектов часто хотят иметь какую-то форму «защиты сметы». Ее не следует путать с неопределенностью, которая служит для обеспечения точности самой сметы. Иногда ее называют «расчетом заказчика», предназначенным для обеспечения некоторой гибкости. В зависимости от принятой в организации практике такой «расчет заказчика» может быть «для внутреннего употребления» (то есть скрытым, не показанным явно), но в этом случае следует точно знать, каковы истинные цифры.

## **13.3.2 Методики оценки отдельных статей сметы**

Существуют различные методики оценки отдельных статей. Какие из них приемлемы в каждом конкретном случае, зависит от имеющихся времени и средств, уровня детализации имеющейся информации и целей производимой оценки. Различные подходы рассмотрены в разделах 13.3.2.1–13.3.2.5 в порядке убывания их точности и требуемых усилий.

### **13.3.2.1 Оценка на основе твердых расценок поставщиков и подрядчиков**

Самый большой риск при подобном подходе заключается в возможности упустить что-то в оценке (например, стоимость фрахта или страховку какой-либо единицы оборудования) или сделать ошибку при проектировании, которая потребует исправления на месте. При полном (в разумных пределах) проекте на основе твердых расценок надежных поставщиков и подрядчиков, а также при отсутствии неожиданностей и при включении соответствующей неопределенности оценка, полученная на основе этих данных, должна иметь погрешность  $\pm 5\%$ ! Эту неопределенность и риск рассмотрим ниже.

### **13.3.2.2 Расчеты потребности в материальных и трудовых ресурсах с оценкой в человеко-часах и издержки производства на единицу продукции**

Благодаря множеству систем автоматического составления смет данный подход кажется простым, так как подобные системы включают стандартные требования ко времени и материалам для монтажа стандартного оборудования (например, насосов и теплообменников). Вместе с тем для большинства видов специализированного пищевого технологического оборудования такие стандарты отсутствуют, и поэтому здесь более важна оценка сметчика. Для оценок затрат на строительство расчет потребности в материальных и трудовых ресурсах с оценкой в человеко-часах зависит лишь от точности имеющихся чертежей и степени их детализации. Если размеры здания заданы правильно, то будут правильны и расчеты площадей стен, крыши и пола.

Издержки на единицу продукции для любого региона обычно хорошо известны, и поэтому затраты на строительство могут быть оценены довольно хорошо, *если определено место строительства*! Таким образом, затраты на строительство на основе хороших чертежей и информации о месте расположения могут быть оценены с погрешностью в пределах  $\pm 10\%$  от расчета потребности в материальных и трудовых ресурсах с оценкой в человеко-часах и издержек производства на единицу продукции. Затраты на оборудование определить сложнее, и они существенно зависят от умений и опыта сметчика. Автоматические системы могут дать неверные результаты, хотя и помогают в определении необходимых данных (такие, как ставки заработной платы по тем или иным профессиям в предполагаемой географической зоне).

### *13.3.2.3 Оценка издержек с помощью коэффициента на основное оборудование и с учетом корреляций*

В химической промышленности давно известно правило, что стоимость технологической установки примерно в 4–5 раз дороже основных единиц оборудования. Это вызвано тем, что в подобных установках много трубопроводов и контрольно-измерительных приборов, а само оборудование довольно простое. Пищевые технологические установки включают более сложное оборудование, зачастую изготовленное из нержавеющей стали, и относительно мало трубопроводов и КИПиА (хотя эта ситуация понемногу меняется и в современном оборудовании перерабатывающих предприятий пищевой промышленности стоимость КИПиА может составлять до 40% стоимости оборудования). Таким образом, обоснованного коэффициента для определения общей стоимости пищевой технологической установки по затратам на основное оборудование не существует. Если взять только оборудование, то оказывается, что оно составляет 20–30% общей стоимости, то есть коэффициент может составлять от 3 до 5, а этот диапазон слишком велик, чтобы его можно было применять на практике.

### *13.3.2.4 Оценка издержек на единицу площади (кв. фут) исходя из имеющегося опыта<sup>1</sup>*

Если использование коэффициентов на стоимость основного оборудования довольно ненадежно, то оказывается, что существует поразительное соответствие между многими пищевыми технологическими установками по их средней стоимости на единицу площади. Ориентировочно стоимость крупных (более 100 000 кв. футов) новых пищевых установок в конце 1980-х и в начале 1990-х гг. составляла около 300 долл./кв. фут, из которых около \$100 приходилось на строительную часть, а \$200 — на смонтированное оборудование, включая стоимость монтажа. Фактический разброс цены составлял около  $\pm 15\%$  (\$250–350), а из-за других возможных неточностей разброс оценки цены на основе габаритов и указанных значений в любом конкретном случае составит  $\pm 30\%$ . Это один из самых быстрых способов оценки, причем во многих случаях точность может быть улучшена благодаря информации фирм-поставщиков аналогичных систем.

<sup>1</sup> Для условий небольших производств величины издержек интересней оценивать не на единицу площади, а на единицу величины арендной платы.

### 13.3.2.5 *Оценки, основанные на объемах продаж или производства*

В пищевой промышленности соотношение объемов продаж к величине активов составляет в среднем от двух до пяти и зависит от подотрасли и возраста технологической установки. У новых установок в подотраслях с большой разницей между себестоимостью и ценой продажи это соотношение может быть около 1,0, а у старых систем в подотраслях с небольшой разницей между себестоимостью и ценой продажи — выше 4,0. Еще одно соотношение, которое может быть вычислено по имеющимся данным, — это средние затраты на тонну годового производства продукции (обычно они составляют от \$400 до \$2400), причем это значение выше для относительно сухих продуктов (таких, как зерновые хлопья) и ниже — для относительно влажных продуктов (таких, как мороженое). Диапазон значений настолько велик, что для оценки затрат без дополнительной информации они бесполезны. Тем не менее они могут служить для «проверки разумности» оценок, полученных другими способами. Со временем опытный сметчик собирает такие соотношения и приобретает навык их использования в своей области.

## 13.3.3 **Рекомендуемый подход к оценке капитальных затрат**

### 13.3.3.1 *Определение того, что будет входить в оценку*

Необходимо тщательно определить объемы производства, технологию, сырье, упаковку и стратегию развития предприятия. Каждый из этих пунктов заслуживает отдельного рассмотрения. Объемы производства существенно зависят от прогноза рыночного спроса<sup>1</sup>, который обычно выполняется отделом сбыта, причем для нового продукта дать точный прогноз довольно затруднительно. Даже в случае существующих продуктов спрос может настолько сильно зависеть от цены, что один прогноз сам по себе будет бесполезным. Инженер, отвечающий за подготовку сметы на предполагаемую установку или проект, должен понимать предпосылки определения объемов производства и настаивать на том, чтобы в прогнозе указывалось не одно значение, а некоторый их диапазон. Довольно часто установки описывают, указывая производительность в ящиках в год, в тоннах за день, бутылках в минуту или килограммах в час. Важно различать моментальную и среднюю производительность — обе они важны и должны быть указаны, но существенно отличаются друг от друга. Кроме того, обе производительности могут зависеть от сочетания изделий при выпуске нескольких продуктов на одной установке, что в большинстве случаев обычно и происходит. Поскольку затраты могут зависеть от производительности и объемов производства, обычно для различных предельных значений прогнозируемых объемов необходимо подготовить несколько оценок.

Важной характеристикой производительности установки является продолжительность ее работы, причем при запуске и остановке необходимо учитывать время выхода на технологический режим. Многие пищевые технологические установки работают в три смены по 5 суток в неделю, но часть этого времени обычно затрачивается на мойку и санитарную обработку. Другие установки работают дольше, причем в некоторых случаях на мойку затрачивается меньше времени благодаря более тщательной проработ-

<sup>1</sup> Как правило, рыночный спрос на продукты пищевой переработки подвержен прежде всего сезонным колебаниям.

ке конструкции и соответствующему уходу. Предполагаемый срок эксплуатации может определяться стратегией фирмы или традициями, однако добросовестный инженер должен подвергать сомнению любые подобные предположения, могущие привести к ненужному увеличению издержек. В наиболее успешно работающих фирмах в настоящее время полагают, что можно работать 100% времени — 7 дней в неделю по 24 ч в сутки, причем любое снижение времени эксплуатации необходимо обосновать.

Технологический процесс должен быть описан в словесной форме и в виде схем, являющихся основным «языком» инженера-технолога. На основе установленной ранее средней и моментальной производительности нужно подготовить материальный и энергетический балансы, а также баланс давлений, для чего необходимо конкретно определить если не все, то большинство единиц оборудования. При этом не может быть «черных ящиков» и желательно, чтобы было мало (или вообще не было) общих указаний на единицы оборудования без их конкретных данных, поскольку точно оценить затраты на неизвестное пищевое технологическое оборудование довольно трудно. Именно это и отличает пищевую промышленность от некоторых других отраслей, где существует хорошая корреляция стоимости теплообменников и резервуаров с их площадью, массой или другими легко вычисляемыми характеристиками. Стоимость пищевого технологического оборудования может варьироваться в широких пределах в зависимости от поставщика, причем, что еще более важно, его производительность может существенно меняться.

Ясно, что процедура должна быть итерационной: должен делаться выбор, определяться его последствия, затем делаться новый выбор до тех пор, пока издержки и производительность не будут тщательно проанализированы, а также не будут найдены условия, соответствующие решению поставленной задачи.

Должны быть определены характеристики сырья, включая средства его доставки, физико-химические свойства, восприимчивость сырья к условиям и продолжительности его хранения, затраты и любые специальные требования (такие как мойка/очистка, дезинфекция или изменения свойств). Как и в случае с несколькими другими основными переменными, следует определять не определенные значения, а их разброс, отражающий естественную изменчивость большинства видов пищевого сырья. При оценке выхода следует исходить из 100%-ного использования закупленного сырья. Допуски на потери, сделанные при оценке, не следует путать с допусками, которые делаются в стандартных системах расчета себестоимости. В данной главе мы принимаем, что в стандартной системе калькуляции издержек должны отсутствовать допуски на потери (поскольку на них слишком часто начинают рассчитывать). Если за идеал принято 100%-ное использование сырья, проще увидеть связь между фактической производительностью и затратами. Для оценки следует учитывать конкретный выход продукции и должны быть рассчитаны материальные балансы. Еще раз повторим, что необходимо иметь некоторый диапазон значений.

Наряду со свойствами и диапазоном всех используемых материалов должна быть определена и упаковка конечного продукта. Некоторые упаковочные материалы от влажности портятся и должны храниться в особых условиях; все материалы, входящие в контакт с пищевым продуктом, следует рассматривать как потенциальные пищевые ингредиенты и защищать их от загрязнения. Обычного сухого хранилища здесь может оказаться недостаточным, а выбор определенного упаковочного оборудо-

Таблица 13.3. Типичный перечень оборудования для пищевой технологической установки

Единица оборудования	Описание	Количество	Стоимость	Поставщик
T-3403	Резервуар из нержавеющей стали на 375 гал	1	\$5000	Tri-City Fabricators
A-3402	Смеситель для 10%-ной суспензии твердых веществ, 0,33 л. с.	1	4400	Chemineer
P-3403	Центробежный насос для рециркуляции 50 гал/мин, 3 л. с.	1	2500	Goulds
W-3401	Ленточный весовой дозатор, 800–7800 фунт/час, 0,33 л. с.	1	17590	CST Auto

дования может существенно влиять на затраты, производительность и производительность всей установки.

И, наконец, необходимо принять определенную стратегию развития предполагаемого цеха (предприятия), включая принципиальную возможность их расширения (ожидается, что большинство предприятий будет расширяться, несмотря на то, что некоторые окажутся не в состоянии), определить необходимые предварительные вложения и ограничивающие факторы. В приложении 13.1 приведены некоторые дополнительные данные, использование которых может быть на некоторое время отложено, но в последствии они будут необходимы.

### 13.3.3.2 Подготовка блок-схем

Следует подготовить блок-схемы технологического процесса и общую схему движения материалов. Компонировка и, следовательно, необходимая площадь пищевой установки диктуется потоками материалов, которые также существенно влияют на эффективность конкретных технологических операций и возможность их реализации (особенно на существующих установках), на способы санитарной обработки и безопасность продукции. Все это сказывается на издержках. На основе блок-схем и схемы потоков материалов может быть разработан предварительный строительный чертеж.

### 13.3.3.3 Подготовка схемы строительства

Для определения необходимой площади, расположения отдельных элементов, а также для того, чтобы определить потребность в персонале и потоках материалов, следует подготовить блок-схему строительства. Между блок-схемой строительства и проектом существуют различия. Как было показано выше, адекватная оценка затрат на строительство может быть подготовлена при наличии правильных размеров, и дать такую информацию может блок-схема. Занимаемая площадь — одна из наиболее полезных характеристик пищевой технологической установки, причем допуски на ранних этапах должны быть «щедрыми», поскольку почти всегда понимание требований к оборудованию и размерам бывает недостаточным. По каким-то причинам оборудование по мере развития проекта всегда «плодится» и увеличивается в размерах, и поэтому для подходов и проходов в схеме расположения оборудования лучше принять допуски побольше.

Таблица 13.4. Оценка капитальных затрат

Основное оборудование:	
технологическое	\$20 000
упаковочное	6000
Монтаж	10 000
Строительство	11 000
Площадка	2000
Инжиниринг	4500
Допуск на неопределенность	13 400
<b>Итого</b>	<b>\$66 900</b>

### 13.3.3.4 Определение перечня оборудования

Следует составить перечень оборудования, включающий требования к энергоносителям и коммунальным службам, с указанием его состояния (новое, существующее, модернизированное, б/у), поставщика, стоимости, затрат на монтаж и наименования (или номеров). Для создания перечней оборудования удобно применять обычные электронные таблицы и базы данных. Некоторые пакеты программ непосредственно связаны с системами автоматического проектирования для создания таких перечней на основе схем компоновки и сохранения точной информации при внесении изменений. Здесь точный формат менее важен, чем сохранение необходимой информации и поддержание ее непротиворечивости в ходе реализации проекта. Примером простого перечня оборудования может служить табл. 13.3.

### 13.3.3.5 Подготовка предварительной оценки

Составляется предварительная оценка капитальных затрат с использованием лучших из имеющихся данных, которая представляется в виде таблицы (табл. 13.4). Полезной проверкой «разумности расчета» служит вычисление процентной доли каждой основной строки. Затраты в абсолютном выражении (в долларах) на основе процентных долей определять рискованно, так как в реальности разброс может быть очень большим.

## 13.4 Оценка эксплуатационных затрат

Оценка эксплуатационных затрат зависит от специфики продукта, технологии и применяемых методов производства. К основным составляющим эксплуатационных затрат относятся затраты на сырье, упаковочные материалы, энергию, рабочую силу, амортизацию и на косвенные издержки.

Обычно лучше всего рассчитывать эксплуатационные затраты на год, а затем пересчитывать их для других временных периодов и партии продукта<sup>1</sup>. Принципиаль-

<sup>1</sup> Оборотный рынок пищевых продуктов подвержен сезонным колебаниям, кроме того, ассортимент зависит от платежеспособности потребителя, поэтому в разных регионах ассортимент, объемы, а следовательно, и временные эксплуатационные расходы отличаются.

**Таблица 13.5. Типичные эксплуатационные затраты (\$/год) на производство яблочного пюре**

<b>Сырье:</b>	
яблоки 5 т/час	\$750 000
сахар 365 кг/час	49 640
<b>Упаковочные материалы:</b>	
банки 8761	876 100
ящики 365	54 750
<b>Энергия:</b>	
жидкое топливо 300 л/час	120 000
электроэнергия 500 кВт	50 000
вода 10 м <sup>3</sup> /ч	10 000
Арендованное оборудование	75 000
Рабочая сила, 15 человек	150 000
Амортизация	94 000
Косвенные издержки	100 000
<b>Итого:</b>	<b>2 329 490</b>

При 8 761 000 банок в год средние затраты составляют \$0,266 на банку.

По данным *Bartholomai, A., Ed., 1987, Food Factories — Processes, Equipment, Costs, VCH, Weinheim, Germany.*

но важные величины в любом расчете эксплуатационных затрат — это соотношение выхода готового продукта и затраченного сырья<sup>1</sup>, а также готовых упаковок и затраченного упаковочного материала. Трудозатраты и энергия в производстве пищевых продуктов обычно являются небольшими составляющими эксплуатационных затрат, но они всегда важны. Амортизация в принципе служит для того, чтобы сделать возможным возмещение капиталовложений в основных фондах, и поэтому рассчитывается как некая доля первоначальных капитальных затрат. Пример относительно простого расчета эксплуатационных затрат приведен в табл. 13.5.

Эксплуатационные затраты являются основной, но не единственной, составляющей денежного оборота. К другим его компонентам относятся затраты на сбыт и маркетинг, на общие административные расходы, налоги и страхование.

В пищевой промышленности некоторые из этих затрат могут быть весьма значительными. Например, затраты на сбыт изделий, развозимых по торговым точкам (хлеба, пирожных, закусок) могут составлять до 40% оптовой цены (из-за заработной платы водителей, работников отдела сбыта и существенных затрат на эксплуатацию большого автопарка). Сбыт других продуктов, доставляемых на склады супермаркетов трейлерами, обходится значительно дешевле. Обычно затраты на сбыт таких изделий известны или определяются для конкретного случая (зачастую как средние для всей корпорации).

Здесь уместно кратко остановиться на бухгалтерском учете. Традиционно затраты, не связанные непосредственно с производством, определялись по некоей форму-

<sup>1</sup> Выход готового продукта определяется прежде всего рецептурой и технологическими режимами обработки.

Таблица 13.6. Структура затрат на единицу продукции на примере яблочного пюре

Сырье и упаковочные материалы	74,3%
Энергия	7,7
Рабочая сила	6,4
Косвенные затраты	4,3
Амортизация	4,0
Прочие затраты	3,3
Всего прямых затрат	100
Сбыт (опт и розница)	15
Общие и административные затраты	10
Всего по установке	125
Отпускная цена	137,5
Доход на единицу продукции	12,5
Налоги (около 43%)	5,4
Доход на единицу продукции за вычетом налогов	7,1
Поступление средств	11,1 (\$0,03 за банку)

Данные из табл. 13.5.

ле, например, как процент от стоимости продаж или на одного работника, непосредственно занятого производством продукта. Таким образом, если в фирме затраты на сбыт составляют \$10 млн в год, а общий объем продаж — \$100 млн в год, то говорят, что торговые издержки составляют 10% от объема продаж продукта и затем используют эти данные для оценки затрат на новые изделия.

Предполагается, что эти торговые издержки для всех продуктов составляют одинаковую долю от дохода. Фактически это не так, и такое предположение часто вводит в заблуждение. Большинство фирм производят как изделия, дающие большую долю дохода, так и те, что дают малую долю. Такое неравномерное распределение зачастую описывается правилом «80–20», которое гласит, что 80% объема продаж достигается 20% продукции. Для некоторых пищевых предприятий это несоответствие значительно больше — известны случаи, когда 50% изделий дают 99% объема продаж. Сбытовики зачастую не без оснований шутят, что продать вагон почти так же просто, как продать одну коробку. Иными словами, фактические расходы на продажу большого объема продукции, безусловно, ниже средних по корпорации (в процентах от общего объема продаж), а затраты на продажу продукции, составляющей небольшой объем, выше средних. Уточнение этого вопроса требует решения задачи операционного финансового анализа и опирается на существующие в настоящее время информационные ресурсы.

Инженеру, составляющему предварительную смету, рекомендуется для косвенных издержек установить реалистичные допуски, как если бы расчет велся по объему хозяйственной деятельности. В некоторых фирмах это может привести к определенным разногласиям и может быть не разрешено к применению для официальных оценок, но такой расчет ясно показывает, что инженер хорошо информирован и может способствовать изменению подходов, принятых в данной фирме.



Чистая прибыль после вычета налогов — это чистый доход за минусом всех издержек. Оборот — это чистая прибыль за вычетом налогов плюс амортизация. Существует много других терминов, применяемых в фирмах, как много и литературы, описывающей различные измерители успешной работы (валюта баланса, прибыль до уплаты налогов (*PBT*), прибыль после уплаты налогов (*PAT*), валовая прибыль, чистая прибыль, валовой доход, чистый доход и много других), но большинство их неясно и неоднозначно; как отмечалось выше, оборот (валюта баланса) — наиболее показательная мера общего состояния фирмы и в связи с этим единственная, имеющая для нас значение.

Пример составляющих стоимости на единицу продукции для типичного пищевого продукта приведен в табл. 13.6. В этом случае отпускная цена определена заранее (с помощью изделий конкурентов или как-либо иначе), а прибыль определяется по разнице. В других случаях задача может заключаться в определении отпускной цены при заданной прибыли на единицу продукции. Возможны и другие варианты.

## 13.5 Сравнение вариантов

Различные инвестиционные возможности сравнивают на общей финансовой основе исходя из всего возможного в будущем оборота. Для этого приводят будущие доходы или расходы к единому моменту времени, используя учетную ставку. Эти расчеты относительно просты и легко выполняются с помощью программ электронных таблиц для персональных компьютеров и даже карманных калькуляторов. Критическим фактором в расчете является выбор конкретной учетной ставки. Это стратегическое решение, обычно принимаемое финансовым отделом корпорации.

Здесь фундаментальным понятием является то, что со временем «деньги делают деньги» с процентом (например, поместив их на сберегательный счет, купив облигации или инвестировав их в нечто). Таким образом, один доллар сегодня — это через год доллар плюс процент, который «он заработал», через два года — эта сумма плюс еще процент, и так далее. В форме уравнения это

$$FV = PV(1 + i)^n, \quad (13.1)$$

где  $FV$  — будущая стоимость;  $PV$  — стоимость в настоящее время;  $i$  — процентная ставка;  $n$  — период времени, например, количество лет.

Все это входит в привычное понятие «накопления процентов». В расчете будущего оборота процентная ставка заменяется скидкой, и это уравнение преобразуется в

$$PV = FV/(1 + i)^n. \quad (13.2)$$

«Сегодняшняя» стоимость суммируется, так что уравнение (13.2) дает способ сравнивать проекты, у которых обороты со временем могут меняться. При сравнении проектов самыми выгодными представляются те из них, у которых наибольшая чистая стоимость при какой-либо данной дисконтной ставке. Чистая стоимость — это просто сумма всех будущих доходов на нулевое время (нулевым временем считается то время, когда осуществляются начальные инвестиции, то есть при отрицательном доходе). Будущие потоки финансовых средств могут быть как положительными, так и отрицательными. При правильном выборе дисконтной ставки любой

проект, обеспечивающий положительную чистую стоимость в настоящее время, будет приемлемым (при том предположении, что имеются достаточные финансовые средства). В фирмах наиболее типична ситуация недостатка финансовых средств. В этом случае следует исходить из компромисса между проектами, сулящими наивысший чистый доход при данной дисконтной ставке.

На размер скидки влияют следующие факторы:

1. Прибыли от надежных вложений капитала (например, казначейских векселей и высокопроцентных корпоративных облигаций).
2. Ставка по кредитам, обычно связанная с базисной ставкой, которую устанавливают крупные банки для своих наиболее кредитоспособных клиентов (фактическая ставка для большинства корпораций несколько выше).
3. Степень риска различных факторов (инфляции, неопределенности ситуации на рынке, политической нестабильности, конкуренции) — чем выше принимаемый риск, тем выше устанавливается учетная ставка, чтобы исключить из рассмотрения проекты с недостаточной для компенсации риска потенциальной прибылью.
4. Желаемая норма прибыли на инвестированный капитал (иногда называемая минимальной ставкой доходности).

На практике финансовый отдел обычно устанавливает некоторую учетную ставку для использования ее при анализе проектов в различных условиях в качестве стратегической. В большинстве случаев для инвестирования рассматриваются только проекты с положительной чистой приведенной стоимостью, использующие приемлемую дисконтную ставку. Проекты с самыми высокими значениями имеют обычно высший приоритет.

Неправильное применение этого аналитического подхода может привести к эффекту, противоположному ожидаемому. Большинство корпораций имеют своей целью максимизацию доходности для владельцев путем максимизации прибылей и оборота. Когда эта цель находит свое отражение в слишком высокой дисконтной ставке, при инвестировании акцент делается на относительно краткосрочные проекты с низкой степенью риска в ущерб более крупным, потенциально более ценным с точки зрения перспективы проектам. Можно возразить, что более ценные проекты должны демонстрировать как-то свою ценность, но зачастую фирму заставляет делать перспективные инвестиции в долгосрочные проекты принятая ею стратегия и даже вера. Таким образом, выбор дисконтной ставки (или ставок) для применения в анализе инвестиционных возможностей корпорации — это серьезная задача с серьезными последствиями.

Другой часто применяемой для сравнения оценкой служит внутренняя норма прибыли (*IRR*). Это значение дисконтной ставки, для которого чистая приведенная стоимость всей ликвидности равна нулю, и ее определяют методом подбора. *IRR* позволяет ранжировать альтернативные проекты по относительной норме прибыли независимо от ее размера, который может влиять на чистую приведенную стоимость, поскольку более крупные проекты обычно предполагают большие обороты, однако такой метод анализа имеет несколько недостатков. Существуют некоторые необычные случаи, дающие несколько значений *IRR*, а это может привести к ранжированию, отличающемуся от получаемого на основе чистой приведенной стоимости. Так

как чистая приведенная стоимость точно отражает вклад данного проекта в капитализацию фирмы, ранжирование по этой величине верно, а следовательно, величина *IRR* ненадежна. Тем не менее многие фирмы по-прежнему ее используют, и поэтому может оказаться разумным при необходимости ее вычислять.

Существуют и другие характеристики прибыли, в том числе срок окупаемости и простая прибыль на инвестированный капитал, которые не дают новой информации и являются слишком упрощенными. Использовать их для оценки альтернативных инвестиций не рекомендуется. Для полноты картины приведем принятые определения этих величин. Срок окупаемости получают делением начальных инвестиций на годовой оборот — для определения времени, за которое инвестиции окупятся. Если годовой оборот является переменным, как это часто бывает, то эта «простая» характеристика становится более сложной, но по-прежнему не очень помогает при ранжировании вариантов. Годовая прибыль на инвестиции (*ROI*) может оцениваться по-разному (до вычета налогов или после него, на оборот или на прибыль, средняя или переменная), что усиливает неопределенность и снижает полезность этой характеристики. Обычно *ROI* определяют путем деления какой-либо характеристики прибыли (например, прибыли после вычета налогов) на начальные инвестиции, выражая результат в процентах. Эту величину можно сравнивать с другими характеристиками прибыли, как в рассмотренном случае с дисконтной ставкой. Однако поскольку прибыль редко бывает постоянной из года в год, эта величина несет в себе мало смысла.

Чистая приведенная стоимость не используется при выборе проектов, принципиально важных для существования предприятия, но не вносящих непосредственного вклада в увеличение капитализации (так называемых «обязательных» проектов, требуемых, например, для сохранения окружающей среды, безопасности людей, безопасности продукции, выполнения требований или норм по качеству). Такие проекты на первый взгляд не вносят непосредственного вклада в прибыль (только в виде сэкономленных штрафов) и поэтому обычно не дают высоких значений чистой приведенной стоимости. В большинстве случаев подобные «обязательные» проекты имеют приоритет при распределении имеющихся капиталов над наиболее привлекательными прибыльными проектами, поскольку невыполнение требований по охране окружающей среды или по технике безопасности может означать крах фирмы.

## 13.6 Корректировка оценок во времени

Существует ряд опубликованных индексов затрат (*cost indices*), позволяющих сопоставить сделанные в один момент времени оценки с оценками в другой момент времени. Среди них индексы *Engineering News Record*, *Marshall and Stevens*, *Nelson refinery* и *Chemical Engineering plant construction index*. Существует также несколько специальных индексов затрат. Хороший анализ приведен в работе [2]. Каждый индекс состоит из взвешенной комбинации трудовых и материальных затрат, которые, как считается, отражают полную стоимость соответствующих проектов. Произвольно задается определенный год со значением индекса 100, и значения других лет определяются как доля от него. Таким образом, корректировка оценки, верной для одного года, для другого года осуществляется умножением на отношение индексов для двух лет. Для пищевых производств сравнимые индексы отсутствуют, а индексы, которые

могут считаться приемлемыми, значительно отличаются друг от друга, в связи с чем инженер-сметчик должен опытным путем определить такой индекс, который для него или его организации подходит лучше всего. Можно, например, для строительства рекомендовать индекс *Engineering News Record*, а для оборудования — индекс *Marshall and Stevens*, поскольку он учитывает затраты на монтаж.

## 13.7 Риски и неопределенность

Риски и неопределенность заслуживают отдельного рассмотрения, так как из-за неверных представлений о них возникает больше ошибок, чем из-за любых других аспектов оценки затрат и прибылей. Все проекты и оценки включают некоторую степень риска<sup>1</sup>. Среди возможных рисков<sup>2</sup> можно отметить:

- риск запросить недостаточно средств, а затем просить еще, оказавшись не в состоянии завершить проект (из-за отсутствия денег), или испытывая серьезные затруднения и угрозу карьере в ходе получения дополнительных средств;
- риск слишком высокой оценки затрат на тот или иной хороший проект, так что он не сможет получить финансирование и не будет начат, тогда как по сути он должен был выполняться (в этом случае фирма теряет возможность получить потенциальную прибыль);
- риск того, что в ходе строительства произойдут события, которые повлекут рост затрат несмотря на правильность первоначальных оценок, сделанных без учета этих неблагоприятных событий (это ведет к тому же результату, что и слишком низкая оценка, хотя, возможно, с менее тяжкими последствиями для участвующих сторон);
- риск, что произойдут события, которые отодвинут сроки и приведут к тому, что получение дохода от проекта будет отложено. С учетом инфляции это может весьма отрицательно отразиться на чистой приведенной стоимости (см. [6]). Так, в примере из [6] задержка проекта на 1 год при прочих равных условиях меняет чистую приведенную стоимость при ставке в 10% с \$80 000 до \$72 700. На практике при задержке проекта затраты почти всегда растут, усугубляя отрицательный эффект отставания от графика;
- риск, что технологический процесс не сможет обеспечить планируемые показатели — например, выход изделий будет ниже ожидаемого (такие случаи являются отклонениями от предположений, сделанных при оценке эксплуатационных затрат и потенциальной прибыли).

Для учета этих рисков<sup>3</sup> сметчики используют, как отмечалось выше, понятие неопределенности. Неопределенность — это допуск в оценке капитальных затрат для

<sup>1</sup> С точки зрения неопределенности риск — это возможность понесения ущерба или убытков вследствие занятия предпринимательской деятельностью.

<sup>2</sup> С точки зрения величины и критичности потерь возможные риски можно разделить на: а) убытки и потери за счет прибыли; б) убытки и потери за счет оборотных средств; в) убытки и потери за счет основных фондов.

<sup>3</sup> Для определения степени риска используются два основных метода: статистический и экспертный, для которого определяются вероятные, маловероятные и случайные факторы риска.

Таблица 13.7. Рекомендованные коэффициенты неопределенности

Этап/стадия	Неопределенность, %
Эскизное проектирование	25
Техническое проектирование	—
Строительная часть	10
Технологическая часть/упаковка	15

компенсации ошибок в оценке и некоторых небольших отставаний по срокам графика или неблагоприятных событий. Неопределенность не предназначена для компенсации значительных отклонений, больших изменений графика или значительных неблагоприятных событий. Правильно подготовленные оценки должны ясно определять, какие неопределенности учтены и какие сделаны предположения. Чем менее детально имеющаяся информация (в виде рисунков, технических характеристик и технологических схем), тем более вероятны ошибки в оценках и то, что «щедрая» (большая) неопределенность будет ими «поглощена». По мере того, как в ходе конструкторской работы появляется та или иная дополнительная информация, допуск на неопределенность может быть уменьшен. Ни один опытный специалист (сметчик) по расчету капитальных затрат не допустит, чтобы неопределенность была равна нулю. Исследования показали, что даже когда проекты завершены на 95%, возможна 5%-ная ошибка в прогнозе их окончательной стоимости [3].

Распространенная ошибка, ведущая к завышенной оценке стоимости проекта («раздутой смете»), — это смешивание неопределенностей. Это может произойти, например, при вычислении стоимости единицы продукции, когда допуск на неопределенность появляется в оценке капитальных затрат, а затем другая неопределенность применяется к оценке стоимости единицы продукции.

Капитальные затраты зачастую оцениваются по отдельным блокам, например, по электротехнике, технологии и механике. Каждый компонент может явно или неявно включать свой коэффициент «запаса», свою неопределенность. Если к полной оценке прикладывается затем еще один коэффициент, это может излишне увеличить стоимость.

Рекомендуемые коэффициенты неопределенности для различных классов проектов, встречающихся в пищевой промышленности, приведены в табл. 13.7.

## 13.8 Заключение

При оценке затрат и прибылей следует учитывать особенности того или иного предприятия. Капитальные затраты оцениваются и рассчитываются для выбора наилучшего варианта капиталовложений, который увеличит капитализацию данной фирмы. Принципиально важно выполнять анализ «чувствительности» любой оценки по большинству принятых значений в определенном диапазоне. Крайние значения, как и «наиболее правдоподобные», должны быть проверены.

В конце 1980-х и начале 1990-х гг. затраты на полностью скомплектованные пищевые установки составляли около \$300/кв. фут. Для производства пищевых продуктов

стоимость сырья и упаковки составляет около 70% стоимости продукта, и примерно по 10% приходится на трудозатраты, энергию и т. п., включая амортизацию. В отдельных случаях возможны более значительные отклонения, но эти проверенные на опыте соотношения могут служить для «проверки разумности» конкретных оценок.

## Дополнительная информация

*The Engineering Economist* – недорогой журнал, публикующий результаты научных исследований общего характера. Он публикуется Институтом инженеров-технологов (*Institute of Industrial Engineers*), его адрес: 25 Technology Park, Norcross, Georgia 30092.

Bartholomai, A., ed., 1987, *Food Factories – Processes, Equipment, Costs*, VCH Weinheim, Germany представляет собой сборник проектов пищевых установок и оценок стоимости в основном для разнообразных небольших установок. Некоторые данные приведены в приложении 13.2.

Некоторые другие не цитированные выше материалы по инженерной экономике, которые могут служить источниками справочной информации:

- Happel, J. and Jordan, D. G. *Chemical Process Economics*. – NY: Marcel Dekker, 1975.
- Holland, F. A., Watson, F. A., and Wilkinson, J. K. *Introduction to Process Economics*. – NY: John Wiley & Sons, 1974.

Два справочных издания посвящены экономике пищевой промышленности:

- Connor, J. M., 1988, *Food Processing—An Industrial Powerhouse in Transition*, Lexington Books, Lexington, MA.
- McCorkle, C. O., ed., 1988, *Economics of Food Processing in the United States*, Academic Press, San Diego, CA.

## Литература

1. Howe, K. M. Perpetuity rate of return analysis // *Eng. Econ.* – 1991. – 36(3). – P. 248–257.
2. Jelen, F. C., ed. *Cost and Optimization Engineering*. – NY: McGraw-Hill, 1970.
3. Merrow, E. W., Phillips, K. E., and Myers, C. W. *Understanding Cost Growth and Performance Shortfalls in Pioneer Process Plants*. – Santa Monica, CA: RAND Corporation, 1981.
4. Moresi, M. Economic study of concentrated citrus juice production // *Engineering and Food: Processing Applications*. – Vol. 2 / McKenna, B. M., ed. England: Elsevier, 1984.
5. Valle-Riestra, J. R. *Project Evaluation in the Chemical Process Industries*. – NY: McGraw-Hill, 1983.
6. Valentas, K. J., Levine, L., and Clark, J. P. *Food Processing Operations and Scale-Up*. – NY: Marcel Dekker, 1991.

## Приложения

### Приложение 13.1 Основная необходимая информация

#### СЫРЬЕ

Перечень всех видов сырья

Состав основных сырьевых ингредиентов

Форма получения — размер, форма, объемы, масса  
Ожидаемый выход по основным сырьевым ингредиентам  
Методы доставки — автотранспорт, железнодорожный, другой  
Поставщики основных сырьевых ингредиентов  
Управление запасами  
Контроль качества  
Особые требования к поставкам, погрузочно-разгрузочным работам и хранению

## **ТАРА И УПАКОВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

### **ТАРА**

Перечень описаний всех упаковок готовых продуктов  
Перечень всех требований к таре по типоразмерам, форме, объему, массе  
Способ получения тары — на поддонах, в коробках  
Способ поставки — автомобильный, железнодорожный транспорт, прочее  
Управление запасами  
Контроль качества

### **УПАКОВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

Перечень всех упаковочных материалов, включая

- картонные упаковки
- коробки
- пленки
- внешняя защитная упаковка

Клеи

Ярлыки

Прочее

Следует обеспечить получение вышеуказанной информации и отметить любые особые требования к поставкам, погрузочно-разгрузочным операциям, транспортировке или хранению тары и упаковочных материалов.

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ**

Перечень текущих и будущих технологических операций

Блок-схемы технологических операций

Годовой объем производства по той или иной технологической операции

График работ по технологическим операциям — количество дней в год, смен в сутки, часов за смену

Производительность работы технологических линий и их эффективность

Оценка времени на:

- мойку/очистку;
- переключения

Перечень оборудования для каждой технологической операции с соответствующими принадлежностями

Схема технологической линии, чертежи оборудования и его технические характеристики (по возможности)

Контроль качества

Описание направлений потоков отходов/стоков

**УПАКОВОЧНЫЕ ОПЕРАЦИИ**

Перечень существующих и будущих упаковочных операций  
 Описание готовой продукции — размер, форма, масса, объем  
 Количество изделий в ящике/коробке  
 Размер и масса ящиков/коробок  
 Количество ящиков/коробок на поддоне/паллете  
 Размер и масса поддонов/паллет  
 Контроль качества  
 Описание направлений потоков отходов/стоков

**СКЛАДИРОВАНИЕ**

Уровень запасов по тому или иному изделию  
 Количество оборотов запасов за год  
 Сбыт изделий:  
   — полученных с данного предприятия  
   — полученных с других предприятий  
 Высота штабелирования  
 Распределение по:  
   — поддонам  
   — ярусам  
   — ящикам/коробкам  
 Технология:  
   — количество смен  
 Методы пакетирования  
 Автотранспортные и железнодорожные операции

**Приложение 13.2 Сводка данные о затратах для пищевых установок**

Процесс	Общая стоимость, \$	Площадь, кв. футов	Стоимость оборудования, \$	Сырье, т/ч	Готовая продукция, т/ч
Переработка яблок	2923	20 000	2006	5	4
Консервирование	204	1500	123	5	4,8
Фруктовое пюре	1100	5000	782	4	3
Фрукты многоцелевого использования		1000	402	3	2,4
Апельсиновый сок	2057	20 000	1116	20	1,6
Детское питание	200	3000	184	6,6	5,5
Томатная паста	1837		1087	15	2,5
Замороженные овощи	1350	30 000	852	4,8	2,2
Грибы	116	60 000	41		0,04
Сыр Моцарелла	842	15 000	350	5,6	0,7
Голубой сыр (типа Рокфор)	4093	113 000	2908	11,5	2,1



## Приложение 13.2 (Окончание)

Процесс	Общая стоимость, \$	Площадь, кв. футов	Стоимость оборудования, \$	Сырье, т/ч	Готовая продукция, т/ч
Молочное производство	13 530	70 000	6400	20,8	18,1
Модульное молочное производство	1210	10 000	760	2	0
Сухое молоко	4000	15 000	2835	18	1,7
Цельный яичный порошок	2287	12 000	1357	2,5	0,25
Йогурт	4828	85 000	3477	8	8
Мороженное	2515	17 000	1530	2	2
Обработка риса паром	1379	6000	1004	5	5
Кукурузный крахмал	30 298	24 000	14169	8,3	5,3
Макаронные изделия	2353	20 000	1760	0,73	0,71
Лазанья (полуфабрикат)	3261	11 500	2305	0,7	0,67
Тофу		1440	350	0,38	1,32
Хлебопекарные дрожжи	26 550	80 000	11 049	2,5	1,14
Уксус	750	3750	525	0,033	0,31
Кнели	985	3500	600	0,66	0,66
Маисовые чипсы (тортилья)	1688	9500	1270	0,5	0,55
Кукурузные снеки	310	5000	131	0,18	0,27
Сом	2400	12 000	1040	3,2	1,8
Креветки	431	6000	204	0,5	0,25
Сурими (измельченная рыба)	10 000	115 000	6080	15	5,7
Забой скота	3660	52 000	930	40	16
Колбаса, получаемая созкструзией	2000	10 000	1049	1	1
Восстановление белков	2671	10 000	1972	12	6
Извлечение соевого масла из бобов	24 900	25 000	6200	42	42
Рафинирование растительного масла	2359	10 000	1456	2	1,8
Формовой хлеб	2803	28 000	1795	1,5	2,2
Пита (арабский хлеб)	1272	10 000	702	1,2	1,7
Замороженные полуфабрикаты французских батонов	1953	10 560	1228	0,48	0,54
Опреснение морской воды	18 433	1100	9262	3100	417
Фруктовые соки	809	7240	514	2	2
Соевое молоко		3150	910	0,15	1
Фруктовые соки	2424		890	20	1,5
Колбаса	10 323		3219	1	1

Примечание: общая стоимость, площадь застройки, стоимость оборудования, данные по сырью и конечным изделиям приведены по материалам конкретных исследований (большинство по Bartholomai, 1987, данные 1986 г.).

# 14 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ

*Энрике Ротштейн, Джулиус Чу, И. Сэм Саги*

*Перевод Б. Игнатовича под ред. д. т. н., проф. Рыкова В. А.*

## Содержание

- 14.1 Введение
- 14.2 Компьютерное моделирование
- 14.3 Основы моделирования
  - 14.3.1 Формулировка модели
    - 14.3.1.1 Построение имитационной модели технологического процесса
  - 14.3.2 Собственно моделирование
  - 14.3.3 Оптимизация
- 14.4 Процедуры оптимизации
  - 14.4.1 Поисковые процедуры
  - 14.4.2 Метод *RSM* (*Research Surface Method*)
  - 14.4.3 Оптимизация дифференцированием
  - 14.4.4 Методы программирования
- 14.5 Нейронные сети
- 14.6 Программное обеспечение
- 14.7 Некоторые способы применения и примеры
  - 14.7.1 Методы *RSM*
  - 14.7.2 Линейное программирование и оптимизация качества
  - 14.7.3 Максимизация прибыли при производстве яблочного сока
- 14.8 Где получить дополнительную информацию
- Литература

## 14.1 Введение

Термин «моделирование» мы используем здесь для сокращения понятия «математическое моделирование», подразумевающего создание такой математической модели, которая на бумаге является разумной аппроксимацией соответствующей системы, существующей в реальной жизни. Моделирование является мощным средством проектирования пищевых технологий, допускает выполнение на бумаге проектируемых действий, не поглощая сырьевые ресурсы и не тратя понапрасну готовые изделия. При моделировании можно использовать любую временную шкалу, которая соответствует цели моделирования. Уровень приближенности модели к реальным условиям зависит от инженера-проектировщика, он должен быть лишь математически обоснован. Другими словами, главное требование к модели — это чтобы она работала, а не была математически изощренной.

Моделирование используют по многим причинам: чтобы понять поведение сложных диалоговых систем, предсказать результаты работы того или иного оборудования, чтобы выбрать главное требование к модели — это чтобы она работала, а не была лишь изощренной, или чтобы выбрать систему управления технологическим процессом или оптимизировать работу уже имеющейся системы. Оптимизация является процессом, выявляющим комплекс параметров, приводящих к максимизации (или минимизации) целей например, минимизировать затраты и максимизировать доход, или снизить уровень нежелательных примесей и максимизировать содержание определенного нужного компонента.

## 14.2 Компьютерное моделирование

Компьютеры существенно расширили возможности инженеров пищевой промышленности и сделали математический аспект моделирования относительно простым. В настоящее время обычным явлением стала работа на персональном компьютере с использованием самых разных программных средств — от электронных таблиц, где модель строится по эскизам, до объемных пакетов программ различной степени сложности.

Компьютерное моделирование широко используется в химической и нефтехимической промышленности — как в проектировании новых технологических процессов, так и в совершенствовании уже имеющихся [15]. Использование компьютерных методов моделирования ведется с конца 1950-х гг. и в настоящее время приобрело форму пакетов программ [29]. Эти пакеты состоят из блока общих модулей работы технологических установок с соответствующими уравнениями сохранения, а также блока физических свойств тех или иных химических смесей. Эти два блока взаимосвязаны и описывают изменения, происходящие в ходе технологического процесса.

Применение вышеуказанных программных пакетов в пищевой промышленности было довольно редким. Они в лучшем случае предоставляли общую оболочку для моделирования, а его функциональная специфика учитывалась недостаточно. В эти пакеты не были включены основные технологические установки по переработке пи-

шевых продуктов. Наибольшее распространение получили пакеты *ASPEN PLUS* и *SPEEDUP* [29], но они не моделировали технологические процессы с твердыми (сухими) продуктами. Важно отметить, что состояние знаний и математическое представление физических свойств пищевых продуктов и сырья для их получения отстают от знаний и методов обработки материалов, служивших предметом для разработки вышеуказанных пакетов.

## 14.3 Основы моделирования

### 14.3.1 Формулировка модели

В разделе 14.3.1.1 мы рассмотрим общий подход к построению имитационной модели на основе нескольких рекомендуемых основных этапов. Успешное моделирование имеет два дополнительных условия, соответствующих двум этапам цикла моделирования. Во-первых, моделирование требует применения к некоторому набору данных статистических методов их обработки, что поможет выявить модель, наилучшим образом соответствующую этим данным. Формулировка модели на основе нескольких рекомендуемых основных этапов требует применения к некоторому набору данных статистических методов их обработки. Это, в свою очередь, зачастую требует проверки различных связей между данными и возможными моделями. Во-вторых, для проверки соответствия модели конкретному технологическому процессу или для определения наилучшей модели могут проводиться эксперименты. Следует отметить, что модель должна соответствовать заложенным в нее данным, а не только тому явлению, которое она описывает [30, 35].

К общим замечаниям относительно экспериментальных проектов и сбора данных можно отнести то, что данные должны равномерно покрывать исследуемый предмет; должен иметься критерий необходимости данных — модель не была бы перенасыщена ими; должны иметься копии данных; явные несоответствия данных (остаточные погрешности) недопустимы.

#### 14.3.1.1 Построение имитационной модели технологического процесса

##### 1. Постановка проблемы

Имитационные модели используются в процессе решения той или иной проблемы. Первый шаг для формирования модели — точное определение существа проблемы. Необходимо определить границы проблемы — идет ли речь о конкретной технологической операции, является ли данная проблема локальной или общей?

##### 2. Определение целей

Мы должны установить целевую функцию модели, предъявить к ней технические требования. Если целей несколько, как их достичь? Например, следует ли присваивать разные весовые коэффициенты для возможности оценки моделей?

### **3. Понимание технологической системы в целом и сбор данных**

Понимание системы в целом включает сведения о технологическом процессе, о предприятии и о характере его деятельности. Необходимо вникнуть в суть вашей технологии, определить ее специфику и собрать данные, необходимые для моделирования. Это означает не только выявление количественных характеристик, но и определение математических соотношений, например, распределения случайных событий.

Очень полезно обращаться к опубликованной ранее информации по теории исследуемого явления. Если такой теории нет, то следует постулировать какие-либо теоретические предпосылки и протестировать их достоверность на этапе валидации.

### **4. Выбор соответствующего программного обеспечения**

Программное обеспечение следует выбирать, только зная конкретную технологическую систему и природу обрабатываемых данных (см. ниже раздел 14.6).

### **5. Построение схемы технологического процесса**

Определите, на каких участках информация поступает от одной части модели к последующей, а также, какие участки нуждаются в информации одновременно. Такая информация может включать в себя сведения о материалах, потоках продукта, ресурсах — вплоть до потоков денежных средств (в зависимости от сути моделируемой проблемы).

### **6. Создание черновой модели**

Сформируйте вашу модель, используя соответствующее программное обеспечение для имитации процессов. Начните с небольшой и грубой схемы, которую можно всегда расширить при необходимости. На этом этапе старайтесь избегать случайных факторов — главное, чтобы ваша модель была бы логически корректной. При вводе усредненных данных легче подтвердить правильность чернового моделирования.

### **7. Проверка и валидизация первых результатов**

Сравните результаты вашей имитационной модели с ожидаемыми. Убедитесь, насколько модель их оправдывает. Проверка должна гарантировать достоверность модели и/или теории. Сравнивать результаты моделирования следует с дополнительными экспериментальными данными, не использовавшимися при построении модели.

### **8. Совершенствование модели**

На этом этапе для лучшего соответствия модели действительности следует дополнительно ввести в модель влияние случайных или усложняющих технологический процесс факторов. Для проверки функциональности модели запустите программу заново для получения новых результатов и сравните их с реальными данными.

### **9. Поиск альтернативных вариантов модели**

После достижения достаточной степени надежности базовой модели можно начинать вводить альтернативные сценарии и варианты, выбирая те варианты из них, которые лучше всего отвечают поставленной задаче.

## 10. Анализ результатов и заключительные выводы

Полученные результаты моделирования позволяют сделать соответствующие выводы и наметить рекомендации относительно возможных изменений в технологии.

### 14.3.2 Собственно моделирование

Моделирование (и его соответствующее использование при оптимизации) по своей природе может быть локальным или общим. Первое имеет отношение к фокусировке задания на отдельный элемент оборудования или даже на его часть. Второе же рассматривает сложные многофункциональные системы, состоящие из многочисленных элементов.

Рассмотрим, например, установку для сушки картофельных хлопьев. Для анализа потерь сырья и материалов при использовании сырья различного качества и в различных технологических условиях инженер может захотеть смоделировать весь технологический процесс — от загрузки сырого картофеля до выпуска упакованной продукции. С другой стороны, задача может быть локализована на анализе работы барабана сушиллки.

В качестве математических средств обычно используются уравнения массовых и энергических балансов и т. п., которые могут оперировать общей массой сырья, массой определенных компонентов, общей энергоемкостью производства или моментом. В зависимости от конкретной задачи используют или все, или некоторые из этих уравнений, рассматриваются устойчивые или неустойчивые состояния и выбираются соответствующие переменные. Для увязки переменных между собой часто используется эмпирическая корреляция. Если рассматривается устойчивое состояние, задача сводится к решению систем алгебраических уравнений, а при рассмотрении неустойчивого состояния — к численному решению дифференциальных уравнений.

### 14.3.3 Оптимизация

Если предприятие достигло приемлемой безопасности производства и намеченных мощностей, то следующая задача состоит в том, чтобы сделать работу предприятия более экономически выгодной. Это задача потребует определения оптимизационной цели, а также стратегии и тактики ее достижения. Инженер может ставить перед собой одну или несколько целей. Типичными одиночными целями могут выступать безопасность производства, прибыль, затраты, минимизация потребления редкого сырья или сброса сточных вод. Многоцелевая программа подразумевает достижение нескольких целей одновременно.

В общих чертах оптимизация включает определение структуры предприятия и технологических условий, выражающихся в достижении максимального (или минимального) значения заранее определенной цели и имеющих дело с одной или более переменными. Для оптимизации производственных систем разработано большое число математических процедур. Ключевым моментом для оптимизационных меро-

приятый является во многих случаях модель, построенная по результатам предшествующего имитационного моделирования. Степень математической строгости зависит от практического баланса между временем, затраченными усилиями и значимостью результатов.

При выполнении формальной математической процедуры ее элементами являются:

- конструктивные переменные, включающие температуру, давление, расход и т. п.;
- области допустимых значений для равенств или неравенств — для равенств они задают пределы переменных относительно пространства и времени, а для неравенств определяют верхние или нижние пределы переменных, при которых технологическая система может достичь предельно допустимых режимов;
- возможные решения, представляющие значения переменных в заданных границах;
- целевая функция, представляющая функцию от проектируемых переменных, количественно выражающую желаемый результат.

## 14.4 Процедуры оптимизации

Процедур оптимизации существует довольно много, и они продолжают совершенствоваться по мере увеличения интереса к их применению. Задача оптимизации состоит в том, чтобы определить, какие значения независимых переменных дают оптимальное значение зависимой переменной. В связи с этим существует два вида задач:

- задачи, где функциональная зависимость не известна;
- задачи, где функциональная зависимость может быть сформулирована математически.

Когда функциональная зависимость неизвестна, используются поисковые процедуры. Если проблема математически формулируется, процедуры оптимизации проводятся методами дифференцирования или программирования (в зависимости от природы математической задачи).

### 14.4.1 Поисковые процедуры

Поисковые процедуры представляют собой численные методы, основанные на определении целевой функции в начальном множестве значений независимых переменных. Далее выбирается второе множество, и новое значение целевой функции сравнивается с первым. Такое сравнение показывает, увеличивается ли целевая функция относительно оптимального значения. Если все множества оцениваемых значений были отобраны предварительно, перебор вариантов ведется одновременно, а если новые множества данных отобраны на основе информации из предыдущих множеств, то последовательно. Среди хорошо себя зарекомендовавших поисковых процедур — методы золотого сечения, Фибоначчи, Латтиса, Хука и прямой поиск Дживса [см. 2, 5, 12, 16, 17, 32].

### 14.4.2 Метод *RSM* (*Research Surface Method*)

Метод *RSM* строится на «подстраивании» поведения зависимой переменной к соответствующему полиному из независимых переменных. Метод *RSM* базируется на положении, что для  $n$  независимых переменных реакция является функцией уровней, на которых эти переменные объединены. В результате обеспечивается понимание общего поведения системы и наглядно представляются оптимальные области (зоны) [26]. Простота, удобство и широкий диапазон применения метода *RSM* делает его одним из наиболее применяемых в пищевой промышленности. Данный метод особенно ценен при разработках новых изделий. При изменении некоторого числа переменных (например: сахар, соль, кислотность, растительное масло, специи) с помощью данного метода определяются оптимальные возможности их сочетания, дающие наиболее приемлемые органолептические и/или физико-химические свойства изделия [19].

### 14.4.3 Оптимизация дифференцированием

Когда целевая функция непрерывна, непрерывно дифференцируема и не расположена в граничной области, оптимизация может быть проведена аналитически. Это подразумевает решение системы дифференциальных уравнений, составленной из первых производных целевой функции с учетом всех независимых переменных, после чего выполняются обычные математические процедуры для максимальных и минимальных значений [14]. К дополнительным математическим процедурам относятся использование множителей Лагранжа и вариационное исчисление [8, 33].

### 14.4.4 Методы программирования

Когда проблема может быть выражена математически, но не выполняются условия для решения методом дифференцирования, возможно применение методов программирования. Линейное программирование используется, когда граничные условия и целевая функция линейны по параметрам [37]. Линейное программирование также полезно, если проблема имеет нелинейный характер, но может быть сведена к линейным условиям [34].

Динамическое программирование не имеет этого ограничения — это многоэтапный процесс принятия решения, который использует систему или структуру потока информации. Этот метод особенно полезен в работе с многостадийными процессами [6, 7, 18, 27, 33]. Более подробно об этом см. Приложение.

## 14.5 Нейронные сети

Нейронные сети как относительно новый инструмент открывают отличные перспективы для моделирования и оптимизации. Упрощенно нейронная сеть состоит из массива элементов, каждый из которых, получая на входе  $x$ , на выходе дает  $f(x)$  с помощью функции

$$f(x) = 1 / [1 + e^{-x}]. \quad (14.1)$$



Эти элементы (так называемые нейроны) организованы слоями. Для проектировщиков технологических процессов особенно полезной может оказаться сеть «*backprophet*» (дословно «обратно-пропорциональная») [9]. Связь между нейронами соседних слоев строится так, что нейрон получает информацию с предыдущего слоя и передает выходной сигнал соответствующему нейрону в следующем слое. Подобные сети, будучи обеспеченными наборами данных (по входным и выходным значениям), является «самообучаемой», что касается поведения системы. В ходе этого процесса используются «весовые коэффициенты» — до тех пор, пока «обучение» системы не приведет к ожидаемым результатам. В этом смысле данный метод обладает определенной прогностической силой.

Такой метод может оказаться особенно полезным, когда используются эмпирические данные или нет ясного представления о технологическом процессе.

## 14.6 Программное обеспечение

Моделирование и, в частности, имитационное моделирование стало широко доступным с появлением готовых пакетов программ, количество которых растет с огромной скоростью. Имеющиеся программы прошли путь от электронных таблиц, обеспечивающих ядро данных для программ имитационного моделирования, до программ, работающих с библиотеками данных по работе отдельных устройств, включающих банки данных по свойствам материалов и обладающие широкими математическими возможностями. Примерами последних могут служить пакеты *ASPEN PLUS* (разработчик — *Aspen Technology, Cambridge, MA*), *BATCHES* (разработчик — *Batch Process Technologies, West Lafayette, IN*) и *SPEEDUP* (*Aspen Technology*). Определенным лимитирующим фактором в использовании этих пакетов является то, что банков данных по свойствам пищевых продуктов и материалов все еще недостаточно.

Возрастает количество программных пакетов, посвященных решению специфических прикладных задач — например, проектированию оборудования, сушке, контролю состояния окружающей среды и организации сбора и удаления отходов производства, анализу поведения жидкостей в потоке, проектированию узлов и деталей, управлению производственными процессами, экономическим аспектам производства, процессам сепарации и др. Одним из лучших обзоров в этой области является ежегодно выходящий справочник «*Chemical Engineering Progress Software Directory*» [20]. В него включены 32 вида прикладных пакетов, и в табл. 14.1 включены те из них, которые являются наиболее актуальными для проектирования пищевых производств. В Справочнике дается описание последней версии каждого пакета, стоимость и требования к процессору, операционной системе, RAM, к жесткому диску и т. п. В выпуске за 1996 г. представлено свыше 1600 программ и баз данных, доступных в режиме он-лайн, более чем 510 американских и других фирм.

И, наконец, имеется определенное количество программ, использующих «модульный» подход к моделированию. Многие из них разработаны для приложений общего характера — от научного анализа конкретной области до моделирования развития тех или иных отраслей (таких, как банковское дело, транспорт, и т. д.).

**Таблица 14.1. Виды программного обеспечения, наиболее применимые при проектировании пищевых производств**

---

Биохимический инжиниринг, разработка лекарственных препаратов
САПР/ГАП, компьютеризированное проектирование
Получение и обработка данных
Сушка
Контроль за состоянием окружающей среды, организация сбора и удаления отходов производства
Проектирование оборудования
Экспертные системы
Гидродинамика, динамика поведения твердых частиц, анализ потоков
Компьютерная графика
Проектирование узлов и деталей
Оптимизация сетей: теплообменники, сепараторы
Физические и химические свойства
Управление процессом производства, системный анализ, автоматическое управление, измерение параметров технологического процесса
Моделирование технологического процесса
Экономика производства, соотношение «затраты/прибыль», анализ капиталовложений
Управление процессом проектирования и производства, построение графиков, учет оборудования и инвентаря, технический уход и обслуживание
Обеспечение безопасных условий производства, составление таблиц с данными по изменению свойств материалов
Сепарирование: абсорбция, дистиллирование, экстрагирование
Термодинамика

---

Примерами подобных программ могут служить *SLAMSYSTEM* (производитель — *Prisker Corporation, Indianapolis, IN*), *EXTEND* (*Imagine That, Inc., San Jose, CA*), *TAYLOR II* (*F&H Simulation, Inc., Orem, UT*). В пищевой промышленности эти программы могут быть использованы для изучения хода технологического процесса и свойств материалов, для управления технологическими процессами (в порционном и непрерывном режимах), для сетевого планирования, для создания интерфейса «человек-машина», для контроля производственных систем и т. д. Вместе с тем из-за их сложности специалисту по моделированию процессов, прежде чем удастся воспользоваться их преимуществами, потребуется довольно много времени на изучение указанных пакетов.

## 14.7 Некоторые способы применения и примеры

Ниже мы рассмотрим некоторые прикладные программы, широко применяемые в пищевой промышленности. Более подробно аналогичные примеры приведены в работе [36].

### 14.7.1 Методы *RSM*

Рассмотрим два наглядных примера — один посвящен изготовлению продуктов быстрого приготовления с высоким содержанием белка, а другой — оптимизации качества дегидрированного картофеля.

Оптимизация изготовления обезжиренной гороховой муки методом экстрагирования для производства продукта быстрого приготовления с высоким содержанием белка была рассмотрена в работе [3]. Указанный технологический процесс оптимизировался для максимальной величины коэффициента расширения и сенсорной оценки экструдатов и минимальной величины напряжения сдвига. Использовалась пятиуровневая конструкция, а результаты соотносились с полиномом второго порядка

$$y = B_0 + B_1x_1 + B_2x_2 + B_{12}x_1x_2 + B_{11}x_1^2 + B_{22}x_2^2 + E, \quad (14.2)$$

где  $y$  — это или коэффициент расширения или напряжение сдвига или сенсорная оценка;  $x_1$  — подача влаги,  $x_2$  — температура в центральной зоне резервуара;  $E$  — экспериментальная ошибка.

Например, экспериментальные данные показали, что коэффициент расширения  $y_1$  коррелирует с

$$y_1 = 2,676 - 0,376x_1 - 0,135x_2 - 0,081x_2^2, \quad (14.3)$$

что свидетельствует о линейном уменьшении коэффициента расширения изделия при увеличении подачи влаги; максимум наблюдается при увеличении температуры в резервуаре соразмерно с эффектом второго порядка. Условия для максимума или минимума могут быть определены путем математического анализа или экспериментальной проверкой.

Применение метода *RSM* для оптимизации качества кубиков сушеного картофеля рассматривался в работе [24]. Цель состояла в том, чтобы получить максимальный коэффициент регидратации, «воздушности» и водоудерживающей способности, и минимальное бесферментное прожаривание. Процесс включает отбеливание в воде, содержащей пектин и полидекстрозу, сопровождающееся двухэтапным процессом сушки. Бланшированный картофель сначала сушится в высокотемпературной сушилке порционного типа с псевдоожиженным слоем (*HTFB*) в различных экспериментальных условиях. Затем картофель поступает в туннельную сушилку при стандартных условиях.

Независимыми переменными здесь являются температура сушки в *HTFB* ( $T$ ) и время сушки ( $t$ ), концентрация отбеливающих биополимеров ( $c$ ) и время ( $b$ ). Значения этих переменных расположены в следующих диапазонах:

$$135 < T < 155 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad 5 < t < 15 \text{ мин}; \quad 0,5 < c < 1,5\% \quad \text{и} \quad 2 < b < 6 \text{ мин}.$$

Для каждой переменной используется уравнение второй степени.

$$y_k = B_{k0} + \sum_{i=1}^4 B_{ki}x_i + \sum_{i=1}^4 B_{kii}x_i^2 + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^4 B_{kij}x_ix_j, \quad (14.4)$$

где  $y_k$  — одна из четырех вышеназванных переменных,  $x_i$  — закодированные независимые переменные ( $T, t, c, b$ ), а  $B_{k0}, B_{ki}, B_{kii}, B_{kij}$  — постоянные коэффициенты. Данные были скоррелированы с помощью пакета статистических программ.

Таблица 14.2. Влияние технологических переменных на результирующие переменные

Технологические переменные	Результирующие переменные			
	Коэффициент регидратации	«Воздушность»	Водоудерживающая способность	Бесферментное прожаривание
Температура сушиллки <i>HTFB</i>	*			*
Время работы сушиллки <i>HTFB</i>	*	*		*
Концентрация при отбеливании			*	
Время отбеливания				

Примечание: \* свидетельствует о значительном влиянии технологических переменных на соответствующие результирующие переменные.

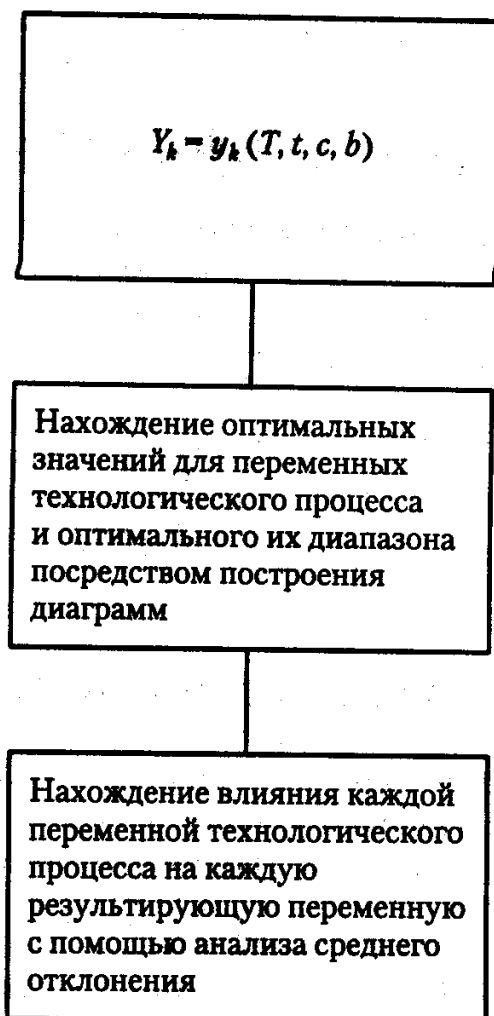


Рис. 14.1. Нахождение оптимального технологического диапазона

С помощью полученных таким образом коэффициентов регрессии данные были обработаны по методу *RSM* согласно рис. 14.1. Анализ среднего отклонения свидетельствует о результатах, приведенных в табл. 14.2.

Оптимальные значения технологических переменных составляют:  $T = 145^\circ\text{C}$ ,  $t = 10$  мин,  $c = 1,2\%$  и  $b = 4,5$  мин. Верификация экспериментов подтвердила эти оптимальные значения, хотя действительная величина для бесферментного прожаривания оказалась ниже, чем предсказывалось.

### 14.7.2 Линейное программирование и оптимизация качества

В работе [31] продемонстрировано применение линейного программирования (ЛП) для оптимизации качества картофельных чипсов. Целевая функция, подлежащая минимизации, — это

$$\phi = M + O + \ln C, \quad (14.5)$$

где  $M$  — массовый процент содержания влаги;  $O$  — массовый процент растительного масла;  $C$  — сумма цветовых значений (красного, желтого и синего).

$$M = 192,2 - 0,426807\theta_f - 0,795T + 9,958b, \quad (14.6)$$

$$O = 54,98 + 0,21156\theta_f + 0,398T - 4,904b, \quad (14.7)$$

$$\ln C = 1,1619 + 0,00463\theta_f + 0,0178T - 0,1546b, \quad (14.8)$$

где  $T$  — температура,  $b$  — толщина, а  $\theta_f$  — время обжаривания. С учетом того, что  $145 < T < 185^\circ\text{C}$ ,  $1,5 \cdot 10^{-3} < b < 20 \cdot 10^{-3}$  м,  $2 < M < 3,39 < O < 41,7 < C < 9,220 < \theta_f < 255$  с, было обнаружено, что оптимальная температура растительного масла должна быть от  $145$  до  $146^\circ\text{C}$ , а время обжаривания —  $220$ – $222$  с.

### 14.7.3 Максимизация прибыли при производстве яблочного сока

В работе [2] для максимизации прибыли при производстве концентрата яблочного сока было использовано линейное программирование на основе неравенств. Схема производства приведена на рис. 14.2. Переменными в данном случае являются  $x_1$  (ввод сырья),  $x_2$  (яблочный жмых, удаленный из прессов непрерывного действия) и  $x_h$  (количество регидратированной воды, используемой для восстановления сока из яблочного жмыха). Восстановление растворимых сухих веществ свидетельствует о нелинейной зависимости от  $x_h$ . Авторы линеаризировали эту зависимость путем разделения кривой равновесия на восемь линейных сегментов, заменяя тем самым  $x_h$  моделируемыми переменными  $x_3$ – $x_{10}$ . Целевая функция имеет следующий вид:

$$\phi = \sum_{j=1}^{10} s_j x_j - \sum_{j=1}^{10} c_j x_j, \quad (14.9)$$

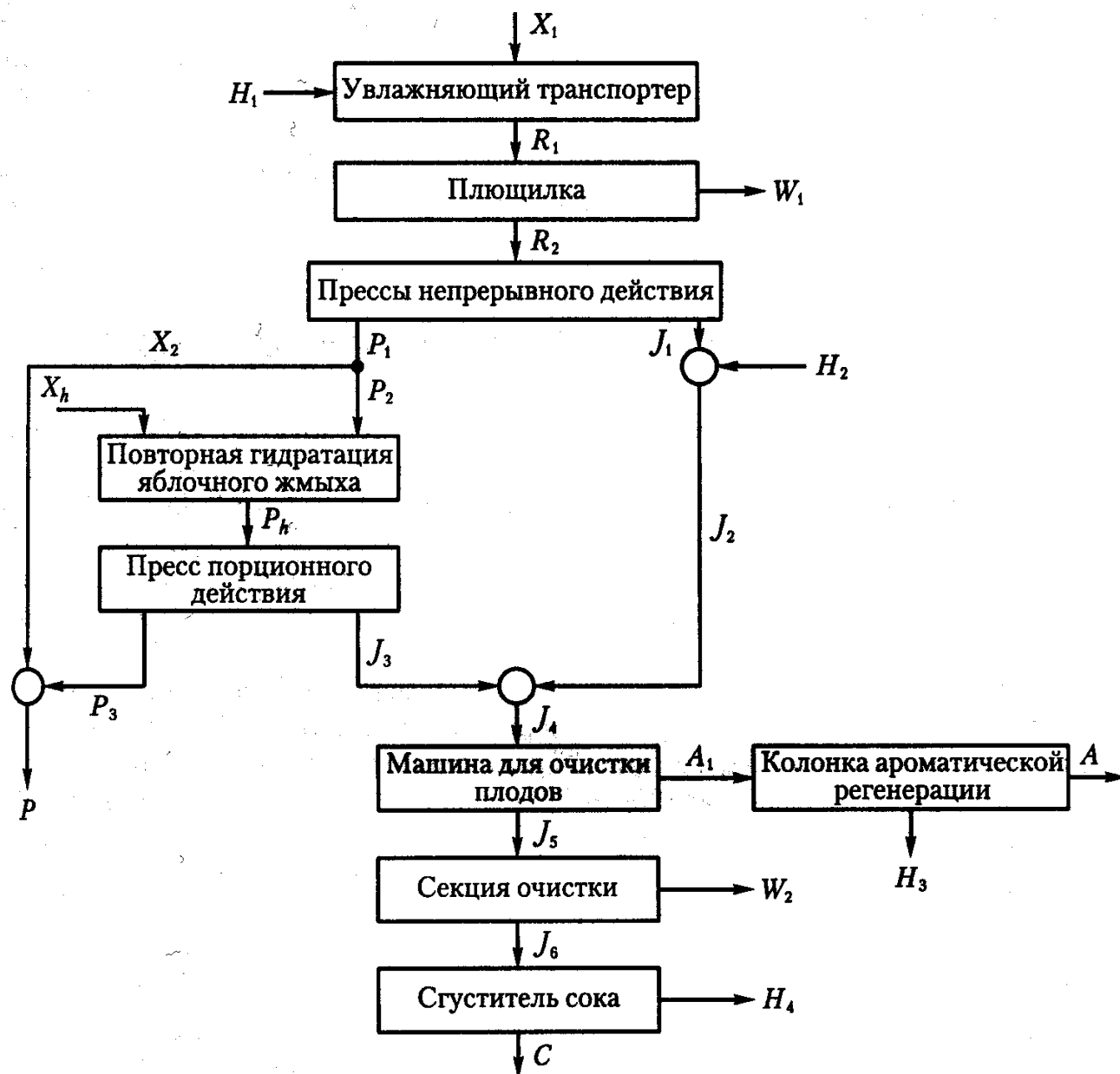


Рис 14.2. Карта технологического процесса установки для изготовления концентрированного яблочного сока:  $A$  — ароматический концентрат;  $A_1$  — головной продукт из ароматического ароматизатора;  $C$  — концентрат сока (72° по Бриксу);  $H_1$  — вода, поглощенная в увлажняющем конвейере;  $H_2$  — промывочная вода прессы непрерывного действия;  $H_3$  — вода, удаленная из колонны ароматической регенерации;  $H_4$  — вода для сгустителя сока;  $J_1$  — сок из прессы непрерывного действия;  $J_2$  — разбавленный сок из прессы непрерывного действия;  $J_3$  — сок с порционного прессы;  $J_4$  — весь сок;  $J_5$  — сок, отделенный от ароматизации;  $J_6$  — очищенный сок;  $P$  — весь уstraненный жмых;  $P_1$  — жмых из прессы непрерывного действия;  $P_2$  — жмых из прессы непрерывного действия, отправленный на гидратацию;  $P_3$  — жмых из порционного прессы;  $P_h$  — жмых после повторной гидратации;  $W_1$  — отходы из установки;  $W_2$  — отходы после очистки;  $X_1$  — обрабатываемые яблоки;  $X_2$  — жмых из прессы непрерывного действия;  $X_h$  — вода для повторной гидратации.

где  $s_j$  и  $c_j$  — соответственно цены продажи и издержки, связанные с соответствующей переменной  $x_j$ .

Ограничительными условиями для данной задачи являются математические выражения относительно сохранения массы, возможности оборудования и обращение с регидратированным яблочным жмыхом. Специфика задачи допускает разнообразие вводимых параметров.

Решение данной задачи показывает, что максимальная прибыль достигается при  $x_1 = 4913$  т/мес без удаления яблочного жмыха из прессов непрерывного действия.

## 14.8 Где получить дополнительную информацию

Для поиска дополнительной информации желательно пользоваться каталогами библиотек предприятий, сетевым информационным поиском и обширными возможностями Интернета. Обычно в прикладных программах используется взаимосвязь моделирования, оптимизации, производства пищевых продуктов и/или технологии. Не бойтесь выходить за рамки пищевых технологий. Литература по другим отраслям промышленности, особенно по химической, во многих случаях также окажется вам полезной.

Помимо ссылок, данных по тексту данного раздела, расширить свои знания в области линейного и нелинейного программирования читатели могут по различным опубликованным работам. Так, в работе [37] дан неплохой обзор по теории линейного программирования, а в работах [25, 28, 36] — по прикладным программам. В работе [4] даны основы нелинейного программирования, а в работе [21] приведено много полезных сведений.

Что касается оптимизации вообще, прекрасные материалы можно найти в работах [1, 10, 17, 23].

## Литература

1. Arora, J. S. Introduction to Optimal Design. — NY: McGraw-Hill, 1989.
2. Bandoni, J. A., Romagnoli, J. A., and Torstein, E. Optimization under uncertainty in inequality constrained linear // Latin Am. Appl. Res. — 1990. — № 20. — P. 189–202.
3. Batistuti, J. P., Cerdeira Barros, R. M., and Gomes Areas, J. A. Optimization of extrusion cooking process for chickpea (*Cicer arietinum*, L.) defatted flour by response surface methodology // J. Food Sci. — 1991. — № 56(6). — P. 1695–1698.
4. Bazaraa, M. S. and Shetty, C. M. Nonlinear Programming. — NY: Wiley, 1979.
5. Beightler, D. J. and Wilde, C. S. Foundations of Optimization. — Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1967.
6. Bellman, R. E. Dynamic Programming. — Princeton, NJ: Princeton University Press, 1957.
7. Bellman, R. E. and Dreyfus, S. Applied Dynamic Programming. — Princeton, NJ: Princeton University Press, 1962.
8. Bertsekas, D. P. Constrained Optimization and Lagrange Multiplier Methods. — NY: Academic Press, 1982.

9. Bhagat, P. An introduction to neural networks // Chem. Eng. Progress. — 1990. — № 86(8). — P. 55–60.
10. Biegler, L. T., Grossman, L. E., and Reklaitis. Application of operation research techniques in chemical engineering // Engineering Design, Better Results through Operation Research Methods / Levary, R. (ed.). — NY: North-Holland, 1988.
11. Box, G. E. P. and Draper, N. R. Empirical Model Building and Response Surface. — NY: Wiley, 1987.
12. Carnahan, B. and Wilkes, J. O. Digital Computing and Numerical Methods. — NY: Wiley, 1973.
13. Dennis, J. E. and Schnabel, R. B. Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations. — Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1983.
14. Dennis, J. E. and Schnabel, R. B. A view of unconstrained optimization // Optimization / Nemhauser, G. L., Rinnoy Kan, A. H. G., and Todd, M. J. (eds.). — Amsterdam: North-Holland, 1989. — P. 1–72.
15. Dimian, A. Use process simulation to improve plant operations // Chem. Eng. Progress. — 1994. — № 89. — P. 58–65.
16. Fletcher, R. Practical Methods of Optimization. — 2nd ed. — NY: Wiley, 1987.
17. Gill, P. E., Murray, W., and Wright, M. H. Practical Optimization. — NY: Academic Press, 1981.
18. Hadley, G. Nonlinear and Dynamic Programming. — Reading, MA: Addison Wesley, 1964.
19. Joglekar, A. M. and May, A. T. Product excellence through experimental design // New Product Development: From Concept to the Market Place / Graf, E. and Saguy, I. (eds.). — NY: Van Nostrand Reinhold (AVI), 1991. — P. 211–230.
20. Lutta Simpson, K. 1966 CEP Software Directory. A Supplement to Chem Eng. Progress. — 1994. — № 92. — P. 1.
21. Minoux, M. Mathematical Programming. — NY: Wiley, 1986.
22. Montgomery, D. C. Design and Analysis of Experiments. — NY: Wiley, 1991.
23. Morris, A. J. Fundamentals of Structural Optimization: A Unified Approach. — NY: Wiley, 1982.
24. Mudagar, G. S., Toledo, R. T., and Jen, J. J. A response surface methodology approach to optimize potato dehydration process // J. Food Process. Preserv. — 1990. — № 14(2). — P. 93–106.
25. Murtagh, B. A. Advanced Linear Programming. — NY: McGraw-Hill, 1981.
26. Myers, R. H. Response Surface Methodology. — 1st ed. — Boston: Allyn and Bacon, 1971.
27. Nemhauser, G. L. Introduction to Dynamic Programming. — NY: Wiley, 1966.
28. Palmer, K. H., Boudwin, N. K., Patton, H. A., Sammes, J. D., Rowland, A. J., and Smith, D. M. A Model-Management Framework for Mathematical Programming // An Exxon Monograph. — NY: Wiley, 1984.
29. Perkins, J. D. Advanced computational methods for process modeling and simulation // Engineering and Food. — Vol. 1. Physical Properties and Process Control / Spiess, W. B. L. and Schuber, H. (eds.). — London: Elsevier, 1990.
30. Rand, W. M. Development and analysis of empirical mathematical kinetic models pertinent to food processing and storage // Computer-Aided Techniques in Food Technology / Saguy, I. (ed.). — NY: Marcel Dekker, 1983. — P. 71–90.
31. Reddy, G. V. and Das, H. Kinetics of deep fat frying of potato and optimization of process variables // J. Food Sci. Technol. (India). — 1993. — № 30(2). — P. 105–108.
32. Saguy, I. Optimization methods and applications // Computer-Aided Techniques in Food Technology / Saguy, I. (ed.). — NY: Marcel Dekker, 1983. — P. 263–320.
33. Saguy, I. Optimization of dynamic system utilizing the maximum principle // Computer-Aided Techniques in Food Technology / Saguy, I. (ed.). — NY: Marcel Dekker, 1983. — P. 321–360.
34. Saguy, I. Constraints to quality optimization in aseptic processing // J. Food Sci. — 1988. — № 53(1). — P. 306–307, 310.
35. Saguy, I. and Karel, M. Index of deterioration and prediction of quality losses // Objective Methods in Food Quality Assessment / Kapsalis, J. G. (ed.). — Boca Raton, FL: CRC Press, 1987. — P. 233–260.



36. Saguy, S., Levine, L., Symes, S., and Rotstein, E. Integration of computers in food processing / / Biotechnology and Food Processing Engineering / Schwartzberg, H. G. and Rao, M. A. (eds.). — NY: Marcel Dekker, 1990.
37. Schrijver, A. Theory of Linear and Integer Programming. — NY: Wiley, 1986.

# 15 ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ БЕЗРАЗБОРНОЙ МОЙКИ (CIP)

Дэйл А. Зейберлинг  
Перевод Н. Савченкова

## Содержание

### 15.1 Введение

### 15.2 Основные принципы

#### 15.2.1 Компоненты системы безразборной мойки

15.2.1.1 Типовое рециркуляционное оборудование

15.2.1.2 Критерии водопотребления

15.2.1.3 Оборудование для подачи химикатов

15.2.1.4 Управление программой CIP

15.2.1.5 Сбор данных для программы CIP

15.2.1.6 Питающие и рециркуляционные трубопроводы системы CIP

15.2.1.7 Движение рециркуляционного (возвратного) потока

15.2.1.8 Струйная мойка технологических емкостей, резервуаров хранения или технологического оборудования, не предназначенного для работы с жидкостями

15.2.1.9 Пневматические клапаны

15.2.1.10 Клапаны, обеспечивающие несмешиваемость сред

15.2.1.11 Переходные U-образные калачи

#### 15.2.2 Критерии для проектирования оборудования для мойки CIP

15.2.2.1 Танковые резервуары

15.2.2.2 Сушилки и печи

15.2.2.3 Система трубопроводов

15.2.2.4 Конвейеры

15.2.2.5 Материалы и отделка поверхности

### 15.3 Варианты применения

#### 15.3.1 Мойка CIP при производстве жидких пищевых продуктов

15.3.1.1 Автоматизированная система трубопроводов через коллекторы

15.3.1.2 Конструирование систем трубопроводов с группами клапанов для автоматизированных технологических процессов

15.3.1.3 Конструирование и монтаж систем трубопроводов CIPS/R (подача/возврат)

- 15.3.1.4 *Определение размеров насосов и управляющих клапанов системы CIP*
- 15.3.1.5 *Мойка CIP как неотъемлемая часть технологического процесса*
- 15.3.2 *Мойка CIP технологического оборудования для производства сухих продуктов*
  - 15.3.2.1 *Использование систем CIP в производстве сухих гранулированных продуктов*
  - 15.3.2.2 *Пример использования CIP в производстве сухих гранулированных продуктов*
  - 15.3.2.3 *Применение CIP в производстве сухих крупяных продуктов*
- 15.3.3 *Типовые программы и процедуры CIP*
  - 15.3.3.1 *Общая последовательность обработки*
    - 15.3.3.1.1 *Качество воды*
    - 15.3.3.1.2 *Выбор моющего вещества*
    - 15.3.3.1.3 *Внешние энергетические факторы*
  - 15.3.3.2 *Стандартные программы мойки*
  - 15.3.3.3 *Контролируемый слив сточных вод для предварительной очистки*
    - 15.3.3.3.1 *Оценка результатов*
- 15.4 *Экономические аспекты*
- 15.5 *Краткие выводы*
- Глоссарий
- Использованные сокращения
- Литература

## 15.1 Введение

Начало развития технологии безразборной мойки (*CIP — Cleaning In Place*) пришлось на последние годы второй мировой войны, то есть на момент, когда обычные материалы для сооружения трубопроводов из луженой меди и нержавеющей стали, а также для напорных «моечных» систем представляли собой определенный дефицит. Некоторые операторы экспериментировали с технологическими линиями из боросиликатного стекла («пирекса»), опасность повреждения которых делала необходимой их безразборную мойку. Быстрый успех, о котором сообщалось в работах [2, 22] и др., стал толчком к развитию специальных сочленений и уплотнений для трубопроводов из нержавеющей стали, позволявших осуществлять их рециркуляционную мойку. В 1951 г. в работе [3] появилось сообщение о методах монтажа трубопроводов из нержавеющей стали, использующих для удаления присадочного металла газовую сварку и шлифование.

В университетах изучение этой развивавшейся технологии началось в начале 1950-х гг., в работе [19] появилось сообщение о размещении на более чем 40 промышленных молокоперерабатывающих производствах стационарных линий из стекла. В 1953 г. были опубликованы результаты исследования [11], в котором были выявлены факторы, имеющие наибольшее значение для оценки эффективности процесса рециркуляционной мойки. Согласно этому исследованию, существенным фактором является скорость потока; в ранних изысканиях предлагалась минимальная скорость — примерно 5 футов/с [1,6 м/с] в самой большой по диаметру трубе всей установки. В середине 1950-х гг. комиссия по стандартам, обслуживавшая молочную промышленность [4], также начала заниматься этим новым направлением и разрабатывать рекомендации относительно проектирования, монтажа и работы систем

трубопроводов, мойка которых осуществлялась без разборки. Был сделан акцент на необходимости наличия на линии возврата регистрирующего (самопишущего) термометра, обеспечивающего построение диаграммы времени при мойке с определенной температурой. Такая диаграмма предоставляла возможность документирования работы соответствующей программы *CIP*.

Внедрение автоматического управления процессом *CIP* и его последующее описание относится к 1953–1954 гг. Первая попытка применения автоматического управления процессом приведена в работе [13] в 1955 г. Было показано, что данный подход дает лучшие результаты по сравнению с тем, при котором временем, температурой и концентрацией управляет оператор, следящий также за правильностью предварительной и завершающей промывки. Впоследствии были описаны [17, 18] мойка посредством сферических (шариковых) распылителей (*Ball Spray Cleaning*), а также радиоизотопная оценка возможности мойки пневматических клапанов. В 1960 г. были запущены новые заводы по переработке молочной продукции, конструкция которых позволяла сочетать в себе сварные трубопроводы, автоматизированную безразборную мойку, а также автоматическое управление потоками с помощью пневматических клапанов. Одно из таких производств в 1960 г. было описано в [1]. В том же году в работе [6] была затронута проблема улучшения качества производимой молочной продукции, что приписывалось внедрению систем автоматизированной мойки *CIP*. Тогда же было опубликовано исследование возможностей мойки различных поверхностей из нержавеющей стали посредством сферических (шариковых) распылителей [8].

К 1964 г. в разработке высокоавтоматизированных систем трубопроводов, а также в развитии систем *CIP* удалось добиться существенного прогресса. Первоначально автоматическое управление потоком продукта осуществлялось за счет систем управления с релейно-контактными логическими схемами. Автоматическая мойка транспортировочных цистерн, всех складских резервуаров и резервуаров, предусмотренных для обрабатываемого раствора, а также соединительных трубопроводов осуществлялась с достаточной степенью надежности. К этому времени аббревиатура *CIP* стала в большей степени означать безразборную мойку, чем «мойку по частям» («*Clean In Part*»). В то же время получили распространение центрифуги, гомогенизаторы, теплообменники и фасовочные машины, представлявшие собой оборудование, безразборная мойка которых оказалась вполне возможной, а в конце 1960-х гг. конструкция систем для работы с жидкими пищевыми продуктами свела ручной труд, применяемый в процессе мойки к следующим операциям: а) разъединение подводящего и отводящего (сливного) трубопроводов; б) подключение технологических линий к нескольким постоянным рабочим магистралям станций *CIP* и/или монтаж соответствующих перемычек; в) включение автоматизированной системы *CIP* для последующей мойки под полным автоматическим управлением.

Несмотря на то что первые этапы развития данная технология прошла в молочной промышленности, в середине 1960-х гг. процедуры безразборной мойки привлекли внимание многих предприятий перерабатывающей промышленности, не имеющих прямого отношения к молочным продуктам. В 1968 г. в работе [14] были выделены оборудование и компоненты проектирования технологического процесса, нуждающиеся в соответствующей механической или химической мойке.

В 1970 г. было отмечено [15] использование систем CIP для мойки резервуаров и магистралей в пивоваренной промышленности, а в конце 1960-х гг. концепции, первоначально разработанные и применявшиеся на молокозаводах, в равной степени могли уже применяться на производствах, изготавливающих жидкие приправы, кулинарные наполнители, различные продукты на основе соевых белков, а также в пивоварении и виноделии. Появление технологии струйной мойки позволило использовать мойку CIP при очистке ленточных конвейеров, применяемых при непрерывном изготовлении сыров типа чеддер, сцеживании сыворотки при производстве сыров итальянского типа, а также при мойке различного рода испарителей с верхней и нижней подачей материала в виде пленки и распылительных сушилок, использовавшихся в первую очередь в производстве молочных продуктов, включая производство сухого цельного и снятого молока. Впоследствии мойка CIP использовалась и для других типов сушилок, применявшихся в производстве пищевых продуктов. Похожие варианты применения мойки CIP были внедрены на производствах по изготовлению супов, соусов, жидкого теста, а также наполнителей и глазури для кондитерских изделий. В мясной промышленности та же основная концепция оказалась применима для мойки оборудования по производству масел, кормов для домашних животных и копильного оборудования. В конце 1970-х гг. упомянутая концепция была впервые применена в фармацевтической промышленности для конструирования и монтажа высокопроизводительных систем по изготовлению внутривенных растворов.

«Сердцем» и «венами» таких автоматизированных процессов являются собственно станция CIP, соответствующие напорные и возвратные трубопроводы, распылительные форсунки и рециркуляционные насосы. Было выявлено, что качество готовой продукции зависит от правильности работы всей системы в целом. Большое внимание следует уделять точности инженерного проектирования и выбору соответствующих распылителей и насосов, что обеспечивает срабатывание гидравлики в нужное время и ее работу в течение всего процесса мойки. Участок трубопровода в системе подводящих и рециркуляционных трубопроводов CIP, кроме увеличения капитальных затрат, воздействует на работу системы по следующим пунктам: а) влияние на потерю давления; б) его емкость влияет на общее количество воды, необходимое для осуществления различных этапов программы CIP; в) возможности дренажа. Особенно критична разработка возвратных трубопроводов, поскольку они сказываются на надежности центробежных насосов, в которых во время осуществления струйной мойки неизбежно возникают воздушные пробки.

Опыт применения систем CIP показал, что их разработка существенно сказывается на многих изменениях в технологии производства. Возможность обеспечить управляемую механическую и химическую мойку и очистку стала толчком к широкомасштабному развитию систем сварных трубопроводов, использованию пневматических клапанов, а также заметному увеличению размеров технологических танков и резервуаров для хранения продуктов. Стало возможным по-другому проектировать и размещать технологические установки. Совокупная задача мойки включает в себя гораздо больше, чем просто мойку насосов, резервуаров, распылителей и организацию управляющей системы. Проектирование современного предприятия по производству пищевых продуктов требует принятия во внимание особенностей материалов и методов конструирования оборудования, планирования его расположения,

конструкции систем мойки и очистки, а также разработки самого технологического процесса. Использование механических и/или химических систем мойки *CIP* позволили найти такие подходы к проектированию, применение которых ранее при осуществлении мойки вручную было невозможным. Достигнутые преимущества включают:

- значительное увеличение производительности технологических процессов;
- снижение потерь за счет применения автоматических клапанов, промываемых системой *CIP*, и внедрения высокоавтоматизированных процессов;
- улучшение качества всех пищевых продуктов и значительное увеличение срока хранения скоропортящихся;
- уменьшение затрат труда на собственно технологический процесс и мойку оборудования.

## 15.2 Основные принципы

### 15.2.1 Компоненты системы безразборной мойки

#### 15.2.1.1 Типовое рециркуляционное оборудование

Применяемая в настоящее время система мойки *CIP* по своей сути является химической. Технологическое оборудование и составные части системы разработаны таким образом, чтобы моющий раствор вступал в непосредственный контакт со всеми загрязненными поверхностями и существовала возможность постоянного его обновления. Поскольку подача относительно больших объемов раствора моющего средства на загрязненные поверхности требуется на срок от 5 мин до 1 ч (или более), для достижения экономичности необходима его рециркуляция.

Существует возможность использования двух различных вариантов системы *CIP* (рис. 15.1). Многотанковые рециркуляционные станции многократного применения способны в течение рабочего дня использовать один и тот же моющий раствор для большого числа операций мойки. По необходимости для поддержания концентрации и моющей способности к данному раствору могут быть сделаны добавки. Однотанковые системы одноразового применения работают на основе автоматического создания небольших объемов раствора необходимой концентрации. В таких системах моющий раствор используется один раз при его максимально низкой концентрации, и по завершении каждого из циклов сливается в коллектор.

Обе системы сопоставимы в том, что касается устройств управления программой. Многотанковые системы занимают больше места и используют большее число компонентов (резервуаров, клапанов, датчиков уровня и температуры), а также на протяжении рабочего дня требуют повышенного внимания относительно проверки состояния раствора, опорожнения и повторного заполнения резервуаров. Кроме того, многотанковым системам недостает «гибкости» по той причине, что единая комбинация температуры и концентрации раствора используется для всего оборудования, подлежащего чистке посредством системы *CIP*. Однотанковая система невелика по размеру, проще в проектировании, требует меньших начальных капиталовложений, а

конструкции систем мойки и очистки, а также разработки самого технологического процесса. Использование механических и/или химических систем мойки *CIP* позволили найти такие подходы к проектированию, применение которых ранее при осуществлении мойки вручную было невозможным. Достигнутые преимущества включают:

- значительное увеличение производительности технологических процессов;
- снижение потерь за счет применения автоматических клапанов, промываемых системой *CIP*, и внедрения высокоавтоматизированных процессов;
- улучшение качества всех пищевых продуктов и значительное увеличение срока хранения скоропортящихся;
- уменьшение затрат труда на собственно технологический процесс и мойку оборудования.

## 15.2 Основные принципы

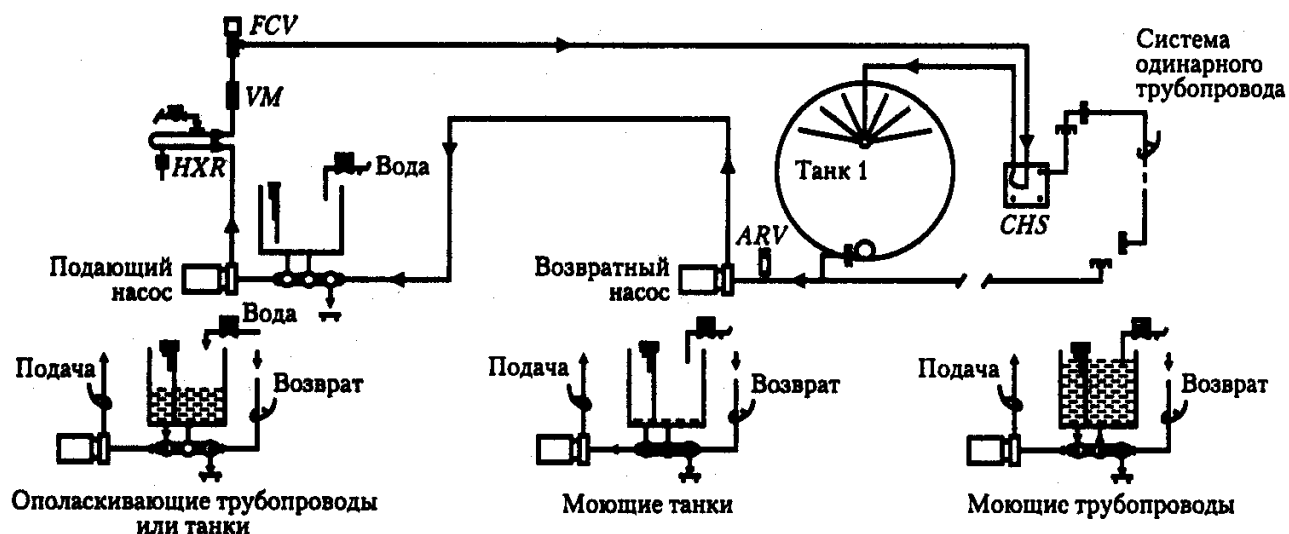
### 15.2.1 Компоненты системы безразборной мойки

#### 15.2.1.1 Типовое рециркуляционное оборудование

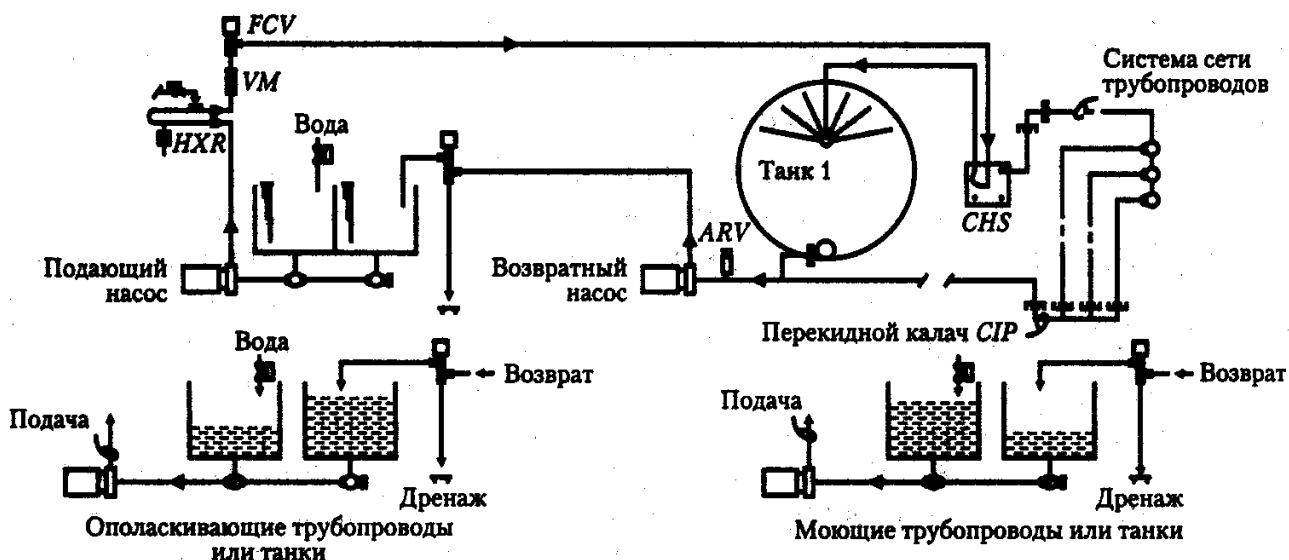
Применяемая в настоящее время система мойки *CIP* по своей сути является химической. Технологическое оборудование и составные части системы разработаны таким образом, чтобы моющий раствор вступал в непосредственный контакт со всеми загрязненными поверхностями и существовала возможность постоянного его обновления. Поскольку подача относительно больших объемов раствора моющего средства на загрязненные поверхности требуется на срок от 5 мин до 1 ч (или более), для достижения экономичности необходима его рециркуляция.

Существует возможность использования двух различных вариантов системы *CIP* (рис. 15.1). Многотанковые рециркуляционные станции многократного применения способны в течение рабочего дня использовать один и тот же моющий раствор для большого числа операций мойки. По необходимости для поддержания концентрации и моющей способности к данному раствору могут быть сделаны добавки. Однотанковые системы одноразового применения работают на основе автоматического создания небольших объемов раствора необходимой концентрации. В таких системах моющий раствор используется один раз при его максимально низкой концентрации, и по завершении каждого из циклов сливается в коллектор.

Обе системы сопоставимы в том, что касается устройств управления программой. Многотанковые системы занимают больше места и используют большее число компонентов (резервуаров, клапанов, датчиков уровня и температуры), а также на протяжении рабочего дня требуют повышенного внимания относительно проверки состояния раствора, опорожнения и повторного заполнения резервуаров. Кроме того, многотанковым системам недостает «гибкости» по той причине, что единая комбинация температуры и концентрации раствора используется для всего оборудования, подлежащего чистке посредством системы *CIP*. Однотанковая система невелика по размеру, проще в проектировании, требует меньших начальных капиталовложений, а



ОДНОРАЗОВОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ CIP



МНОГОКРАТНОЕ (ПОВТОРНОЕ) ИСПОЛЬЗОВАНИЕ CIP

**Рис. 15.1.** В системах безразборной мойки может использоваться различное сочетание резервуаров, насосов и клапанов для создания разных конфигураций. Большинство систем работает на основе одноразового или многократного (повторного) использования. Системы CIP позволяют осуществлять струйную мойку резервуаров и мойку трубопроводов под давлением

также более гибка в применении. Все химические компоненты подаются автоматически в нужных пропорциях и с необходимой концентрацией из транспортной тары или резервуаров бестарного хранения. В 1975 г. появились данные [9, 10, 12] о сравнении работы двух основных вариантов системы CIP. В 1980 г. в работе [21] был проведен подробный анализ обеих концепций, включая используемые моющие средства, подачу химикатов и управление системой.

Однотанковые системы одноразового использования относительно невелики по размерам, и, как правило, поставляются в виде «конструктивно законченных» агре-



готов. Некоторые производители поставляют собранные на заводе системы много-разового использования, но по большей части их монтажная сборка осуществляется вне предприятия-изготовителя с помощью списка оборудования и арматуры, включающего в себя резервуары, трубы, насосы, клапаны, смесители впрыска пара, кожухотрубные нагревательные элементы, а также другие необходимые компоненты.

Накопленный опыт показал, что доставить воду в резервуар проще, чем надежно извлечь ее оттуда с помощью автоматического управления, и в этом заключается основной источник трудностей, связанных с эксплуатацией систем *CIP* с применением распыления. Эффективная промывка, мойка и ополаскивание резервуара или цистерны зависят от степени их опорожнения, то есть наличия минимального количества «застойного» раствора на дне танка. Однотанковый рециркуляционный агрегат одноразового использования при этом более эффективен, чем альтернативные подходы, поскольку возвратный и нагнетательный насосы при рециркуляционных циклах программы мойки конструктивно соединены последовательно, что позволяет избежать проблемы «баланса потоков подачи и рециркуляции». Единственной имеющейся водой в системе является вода в подающем и возвратном трубопроводе системы *CIP S/R (Supply/Return)*, вода на боковых стенках подлежащего мойке резервуара, а также «лужица» на выводе из резервуара. В случае, если в одном из насосов на короткое время образуется воздушная пробка, то другой насос будет поддерживать в системе постоянный ток воды, причем даже кратковременные колебания давления отмечаются крайне редко. Для сравнения, мойка того же самого резервуара при тех же обстоятельствах с двумя танками и насосами приведет к тому, что в одном из насосов воздушная пробка будет возникать на продолжительное время, и результатом этого станет скопление раствора в резервуаре, из которого качает заблокированный насос; поток, а также эффективная мойка скоро прекратятся.

Вместе с тем однотанковая система одноразового использования не способна справиться с проблемой одновременной мойки двух или нескольких резервуаров параллельно с двумя подсоединенными к общему коллектору на всасывающей стороне возвратными насосами. Наилучшим вариантом решения проблемы большого числа возвратных потоков является их направление в отстойный возвратный резервуар под воздействием силы тяжести. Возвратный резервуар служит устройством для удаления воздуха, и 3–4 дюйма воды в этом танке заменяют раствор в промываемом резервуаре в виде «лужицы» на рециркуляционной стороне системы.

Большинство очистных контуров на предприятиях пищевой промышленности включают в себя и резервуары, и сети трубопроводов. На резервуарах устанавливаются стационарные распылители, на которые по трубопроводам системы от станции *CIP* подаются моющий, смывной и ополаскивающий растворы. На рис. 15.1 показана возможность использования дополнительной моечной станции (*CHS, Cleaning Hook-Up Stations*) для подачи растворов от общей магистрали на распылители в нескольких резервуарах. Кроме того, она может снабжать один или несколько трубопроводных контуров магистрали от различных входов. Подача на трубопроводную сеть может осуществляться от любой вспомогательной *CHS*, а отвод возможен к любому имеющемуся коллектору *CIPR*. На рисунке изображено подключение системы одноразового использования к простому однолинейному контуру, тогда как система многократного применения подключена к контуру с несколькими каналами, через

которые в определенном порядке периодически подаются моющих, смывной и ополаскивающий растворы.

В начале 1980-х гг. основной задачей стала возможность осуществления эффективной безразборной мойки больших систем с использованием все меньшего количества воды (это явилось результатом быстрого роста цен на воду, и на очистку промышленных стоков).

При необходимости достижения нулевого уровня биохимической потребности в кислороде (БПК) в сточных водах предприятия пищевой промышленности все моющие растворы необходимо подвергать сепарации и использовать повторно. Эта процедура будет наиболее экономичной в случае снижения объема моющего раствора до минимума.

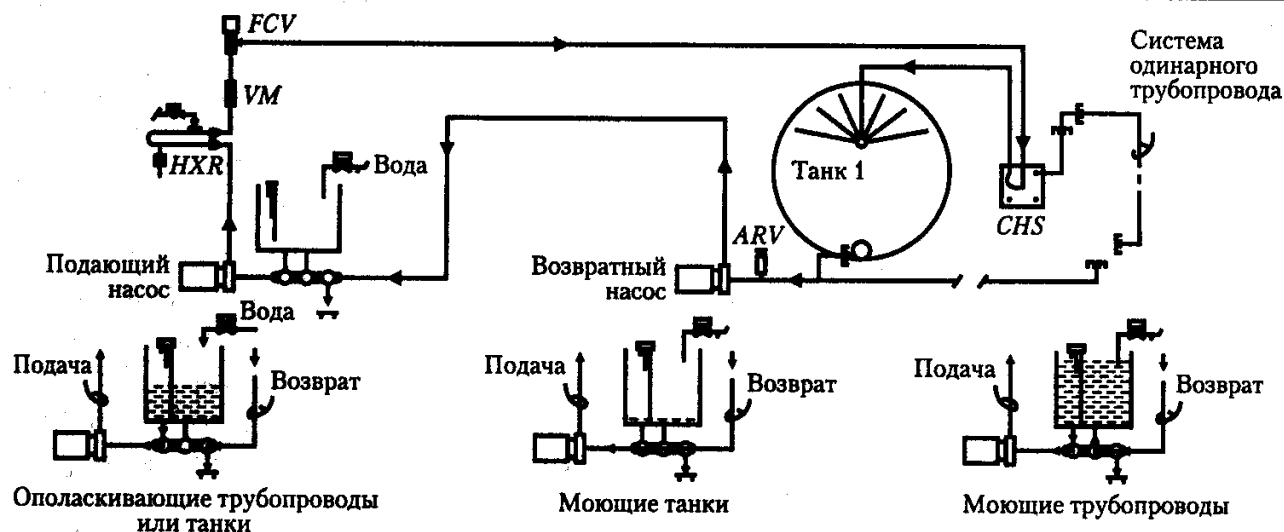
Агрегат безразборной мойки одноразового применения с эжектором (*SUEA*), изображенный на рис. 15.2, представляет собой один из вариантов разрешения проблемы снижения потребления воды. Единственный резервуар для сепарации воздуха и рециркуляции служит также и в качестве передвижного резервуара, а в принципе работы системы с эжектором используется вырабатываемое последним разрежение, требуемое для постоянного заполнения возвратных центробежных насосов, расположенных на концах возвратных коллекторов системы CIP и обеспечивающих наполнение резервуаров. Используется, как правило, возвратная магистраль небольшого диаметра, и она, как правило, только наполовину бывает заполнена жидкостью. Остаток объема заполнен воздухом, который постоянно проходит через выход промываемого резервуара, затем через центробежный насос возвращается обратно в установку. Танк сепарации и рециркуляции воздуха содержит всего 12–15 галлонов (1 амер. галлон = 3,7853 л) раствора, хотя совокупный нисходящий поток через вертикальный участок может достигать расхода от 200 до 240 галлонов/мин. Резервуар силосного типа вместимостью в 60 000 галлонов, расположенный на расстоянии около 100 футов от станции CIP с эжектором, может быть подвергнут рециркуляционной мойке при расходе в 100 галлонов/мин при наличии в системе 40–50 галлонов раствора.

Если система *SUEA* оборудована резервуаром для восстановленного раствора, то вся вода, применяемая для моечных работ, используется дважды: первый раз свежая вода для промывки, а второй раз после рециркуляции — для подкисленного окончательного ополаскивания. После этого она сливается в резервуар для восстановления смывных вод, а затем (в комбинации с моющим раствором, сливаемым в тот же самый резервуар) вновь применяется для предварительной промывки в ходе последующих работ.

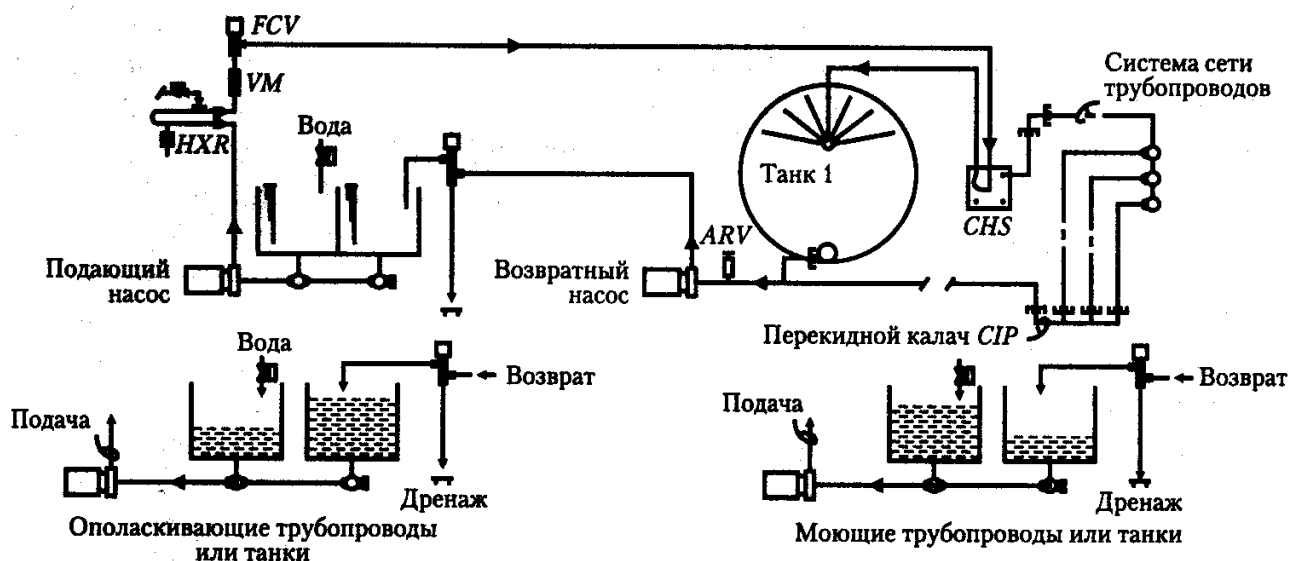
#### 15.2.1.2. Критерии водопотребления

Объем воды, используемый для промывки трубопроводной сети, как правило, в 1,5–2 раза больше объема, содержащегося в трубопроводе, включая систему CIPS/R. В автоматизированных системах этот объем может оказаться несколько больше, так как необходимо упорядочить последовательность срабатывания клапанов для очистки ветвей или участков контура, как это показано на рис. 15.1, отображающем разветвленную сеть (см. нижнюю часть схемы для системы CIP многократного применения).





## ОДНОРАЗОВОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ CIP



## МНОГОКРАТНОЕ (ПОВТОРНОЕ) ИСПОЛЬЗОВАНИЕ CIP

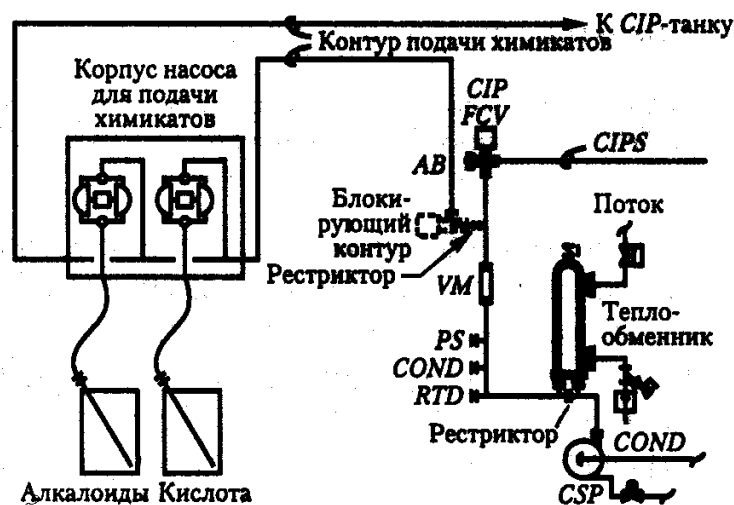
Рис. 15.2. Система CIP типа SUEA надежна в работе, сводит к минимуму потребление воды и химикатов при безразборной мойке резервуара, а также самоочищается

Исходя из этого, объем воды, необходимый для осуществления всей программы (предварительная промывка, мойка моющим раствором, последующее ополаскивание и окончательное ополаскивание подкисленным раствором), будет в 6–8 раз больше, чем при использовании рециркуляционной станции однократного применения. Упомянутый объем может быть уменьшен на 15–20% для таких систем повторного использования, в которых для осуществления нескольких программ работает один и тот же моющий раствор. Это снижение, тем не менее, будет компенсировано за счет количества воды, требуемой для поддержания на приемлемом уровне нагрузки на окружающую среду и достижения первоначального объема, необходимого для заполнения резервуара с моющим раствором.

### 15.2.1.3 Оборудование для подачи химикатов

В дополнение к насосам, клапанам и теплообменникам система безразборной мойки должна включать в себя также средства подачи химикатов и контроля концентрации моющего раствора. Большая часть технологического оборудования пищевой промышленности может быть эффективно промыта раствором, на 99,5–99,75% состоящем из воды. Более концентрированные растворы необходимы только для удаления значительных или «пригоревших» загрязнений. Химикаты, составляющие остальную часть раствора, могут подаваться в жидком или сухом виде, хотя для автоматизированных систем CIP предпочтительна подача химикатов в жидком виде.

Для подачи необходимых компонентов в должных пропорциях и соотношениях в качестве нагнетательных обычно используются пневматические поршневые или диафрагменные насосы. В системах однократного использования регулирование концентрации осуществляется за счет добавления известного количества химических веществ в известное количество воды, рециркулирующей внутри промываемого контура. Химикаты, как правило, подаются непосредственно в резервуар(ы) для моющего раствора системы многократного использования по принципу «запроса», осуществляемого за счет сигнала с датчика проводимости. Вопросы обеспечения безопасности работников заставили многих операторов располагать нагнетательные насосы для химикатов на удаленных участках и использовать «контур подачи химикатов», подобный изображенному на рис. 15.3 для подвода концентрированных химикатов в рециркулирующий раствор. Это позволяет ограничивать доступ концентрированных химикатов к корпусу насоса для подачи химикатов и опускать трубы в питающие резервуары. Наружный диаметр трубопровода такого «контура» в большинстве случаев будет составлять 3/4 дюйма или 1 дюйм. Размеры ограничителя на месте подключения трубопровода подачи системы CIPS задаются таким образом, чтобы управлять движением жидкости на уровне 3–5 галлонов/мин при максимальном напоре выпуска жидкости подающего насоса. Если воздухоудв трубопровода подачи в этой системе CIPS располагается около насоса, а не на регуляторе потока (FCV), то



**Рис. 15.3.** Как правило, химикаты подаются в систему CIP непосредственно из транспортной тары или резервуаров ежедневного потребления. Конструкция контура подачи химикатов позволяет располагать химикаты и насосы на определенном удалении от станции CIP

для предотвращения потери воздуха в контуре, ведущем к резервуару *CIP*, необходима установка защитного (блокирующего) клапана, обозначенного на чертеже пунктиром. На рис. 15.4. приведена фотография корпуса большого насоса для подачи химикатов из бочек и других мерных емкостей, поддерживающего две системы *CIP*, а также систему высокотемпературной ускоренной безразборной мойки (*HTST*). Следует обратить внимание на небольшой диаметр трубопровода контура подачи химикатов, а также на душ и фонтанчик для промывания глаз, установленные по требованию санитарной службы (*OSHA*) на участках, где ведутся работы с опасными химическими веществами.

Системы многократного использования, как правило, программируются на «потерю» в конце каждого моечного цикла небольшого количества раствора, что делается

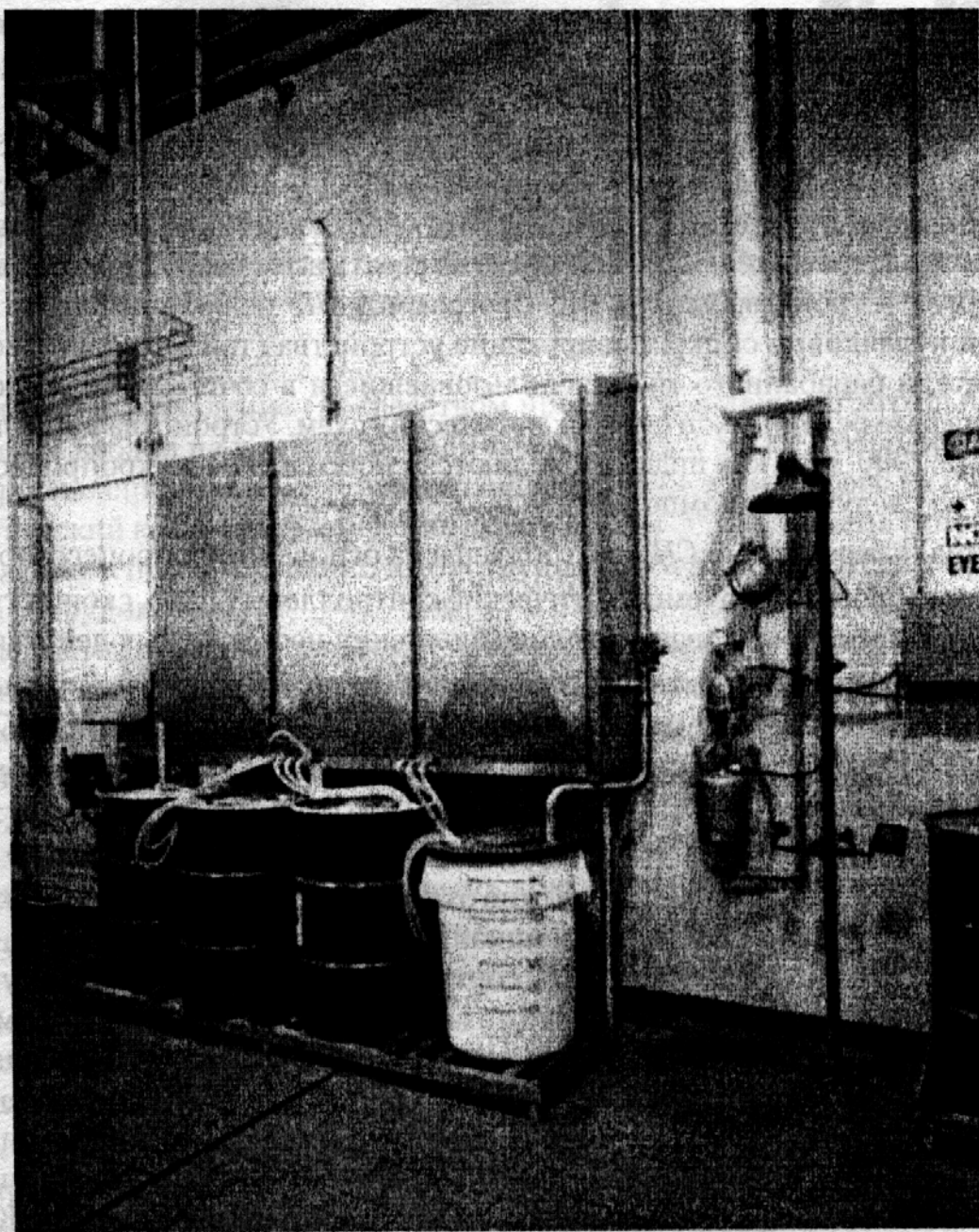


Рис. 15.4. Корпус насоса подачи химикатов — резервуары и мерная емкость с химикатами и душ в цеху по переработке молока



для постоянного удаления из системы загрязненного раствора. После этого осуществляется добавление чистой воды, что должно помочь вывести раствор на нормальный рабочий уровень, а уже затем система подачи химикатов в зависимости от показаний датчика электрической проводимости раствора производит добавление тех или иных химикатов.

#### 15.2.1.4 Управление программой CIP

Система управления программой CIP может быть простой или комплексной в зависимости от характера применения системы CIP. Полностью «автоматизированному» управлению программой мойки отдается предпочтение перед управлением вручную. Это управление должно включать в себя переменные времени промывки, слива и рециркуляции, а также температуры, концентрации и расхода, последние из которых основываются на КИПиА и инженерном проектировании. Для системы, используемой для мойки стационарных или передвижных резервуаров за пределами рециркуляционного блока, автоматизация может оказаться не нужна.

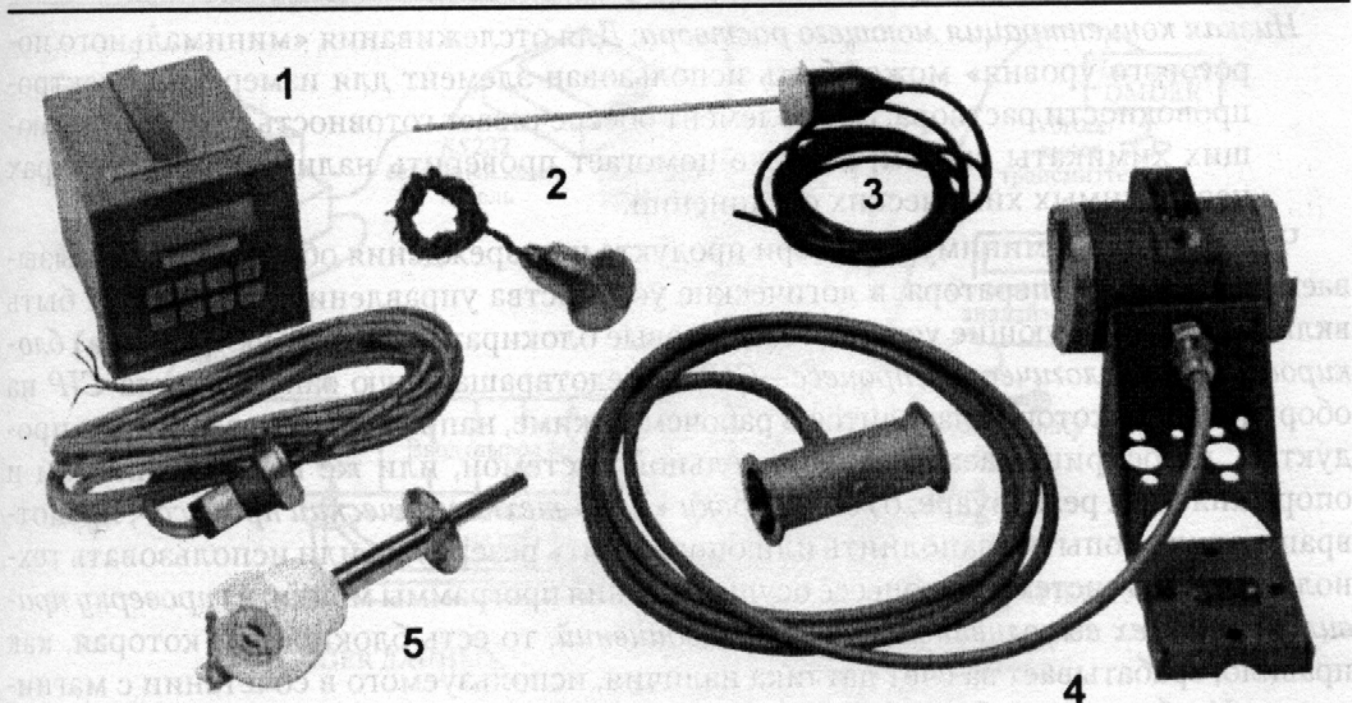
Если технологический процесс подразумевает использование большого количества пневматических клапанов или механического оборудования, а также требует задействования насосов и другого технологического оборудования, то избираемая система управления программой CIP должна соответствовать всем необходимым условиям.

В 1970-х гг. устройства управления программой CIP по большей части представляли собой кулачковые синхронизирующие устройства (таймеры) или же шаговые переключатели барабанного типа, использовавшиеся в сочетании с системами управления на базе релейно-контактных логических схем. Устройства управления программой CIP 1990-х гг., как правило, являются системами на микропроцессорах, состоящими из следующих компонентов:

- специализированные CIP-контроллеры на основе микропроцессоров;
- готовые программируемые логические контроллеры (PLC), сконфигурированные и запрограммированные для выполнения необходимых действий;
- частично из аппаратных средств и программного обеспечения крупных автоматизированных систем или распределенных систем управления (DCS).

Системы управления, в основу которых положены программируемый логический контроллер (PLC) или распределенная система управления (DCS), обладают множеством возможностей, которые не способны предоставить системы с жесткой (фиксированной) разводкой. К ним можно отнести аналоговые входы и выходы, пропорционально-интегрально-дифференциальное (ПИД) регулирование, вывод на дисплей сообщений в кодировке ASCII, порты стандарта RS232 для коммуникации с другими программируемыми логическими контроллерами и компьютерами, а также множество других модулей, позволяющих расширить диапазон применения системы.

Управление программой CIP может осуществляться по времени или по расходу и объему (с контролируемой по времени продолжительностью дренирования резервуаров). Управление осуществляется с помощью расходомера, клапана управления потоком (дресселирование) и необходимого программного обеспечения. К подлежащим воздействию переменным относятся время, объем, температура (через входы термометров сопротивления (RTD) на программируемый логический контроллер



**Рис. 15.5.** К датчикам, используемым при проектировании санитарно-гигиенического оборудования, относятся: (1) датчик проводимости с анализатором/передатчиком; (2) преобразователь давления; (3) датчик (пробник) жидкости; (4) датчик потока с измерителем вихревого потока; (5) *RTD* — термометр сопротивления

или компьютер), давление (посредством пропорционально-интегральных преобразователей и входов на контроллер или компьютер), а также проводимость и удельное сопротивление (через соответствующие датчики и интерфейс на программируемый логический контроллер или компьютер). На рис. 15.5 показаны типовые датчики, применяемые в проектировании и конструировании моечного и санитарно-гигиенического оборудования.

Что касается программирования, то предпочтение отдается матричному программированию как для программы *CIP*, так и для связанных с ней программ для последовательного срабатывания технологических клапанов, насосов, мешалок (миксеров) и технологического оборудования (если их срабатывание необходимо). Существует возможность отслеживания программы *CIP* от начала до конца, а для проверки конкретных операций могут быть выделены определенные контрольные точки.

К таким общепринятым «конечным» контрольным точкам могут относиться:

**Отсутствие обратного потока:** Сигнал, подаваемый датчиком, расположенным в возвратной магистрали и контролирующим наличие обратного потока сразу после первой части предварительной промывки. Отсутствие обратного потока означает наличие неправильного сочленения или неисправность насоса или клапана.

**Логическое устройство управления задержкой моечного цикла:** Орган управления, предназначенный для задержки продолжения программы в момент начала моечного цикла до тех пор, пока весь раствор внутри контура не достигнет необходимой для осуществления мойки температуры, что обеспечит мойку на протяжении соответствующего времени при требуемой температуре.

*Низкая концентрация моющего раствора:* Для отслеживания «минимального порогового уровня» может быть использован элемент для измерения электропроводности раствора. Этот элемент обеспечивает готовность к работе подающих химикаты систем, а также помогает проверить наличие в резервуарах необходимых химических соединений.

Чтобы свести к минимуму потери продукта и повреждения оборудования, вызываемые ошибкой оператора, в логические устройства управления легко могут быть включены блокирующие устройства. Типовые блокираторы могут включать: а) *блокировку «технологический процесс—CIP»*, предотвращающую запуск цикла CIP на оборудовании, которое находится в рабочем режиме, например, на резервуаре с продуктом, и воспринимаемую измерительной системой, или же на наполняемом и опорожняемом резервуаре; б) *блокировку «CIP—технологический процесс»*, предотвращающую попытку заполнить или опорожнить резервуар, или использовать технологическую систему в процессе осуществления программы мойки; в) *проверку правильности всех выполненных вручную соединений*, то есть блокировку, которая, как правило, срабатывает за счет датчика наличия, используемого в сочетании с магнитом на U-образном (обратном) калаче, и служит для проверки правильности всех выполняемых вручную соединений, оказывающих воздействие на выбранный контур системы CIP, а также осуществляет блокировку при превышении заданной температуры, которая останавливает программу, блокирует ее, а затем требует вмешательства оператора для устранения причины. Такие действия могут предотвратить повреждение (сплющивание) резервуара, вызываемое ополаскиванием его холодной водой после того, как резервуар и содержащийся в нем воздух окажутся нагреты до недопустимо высокой температуры.

Система управления должна давать возможность «производственному персоналу» и сотрудникам Службы качества отслеживать и регулировать те переменные, которые оказывают воздействие на работу системы CIP. Тем не менее доступ к средствам регулировки упомянутых переменных должен быть ограничен и закрыт для оператора, задачей которого является только запуск, остановка и перезагрузка программы.

#### 15.2.1.5 Сбор данных для программы CIP

Согласно стандарту 3А, применяемое в молочной промышленности и используемое в качестве руководства для других пользователей систем CIP правило гласит: «температура раствора должна регулироваться автоматически с помощью терморегулятора с диапазоном чувствительности  $\pm 5^\circ\text{F}$ ». Как правило, это требование если и выполняется вообще, то довольно свободно, поскольку не существует требований, касающихся конкретной температуры, используемой в процессе мойки. Тот же самый стандарт предписывает наличие «регистрирующего (самопишущего) термометра с диапазоном шкалы от 60 до 180  $^\circ\text{F}$  с разрешенным ее расширением на любой из сторон. Шкала времени термометра должна быть градуирована на деления, не превышающие 15 мин. Между 110–180  $^\circ\text{F}$  диаграмму следует градуировать на температурные деления, не превышающие 2  $^\circ\text{F}$  с интервалами не менее 1/16 дюйма, находящимися в точности в диапазоне  $\pm 2^\circ\text{F}$ . Датчик должен быть защищен от повреждений при 212  $^\circ\text{F}$ , а чувствительный элемент регистрирующего термометра должен располагаться в магистрали рециркуляции раствора». Целью упомянутого требования явля-



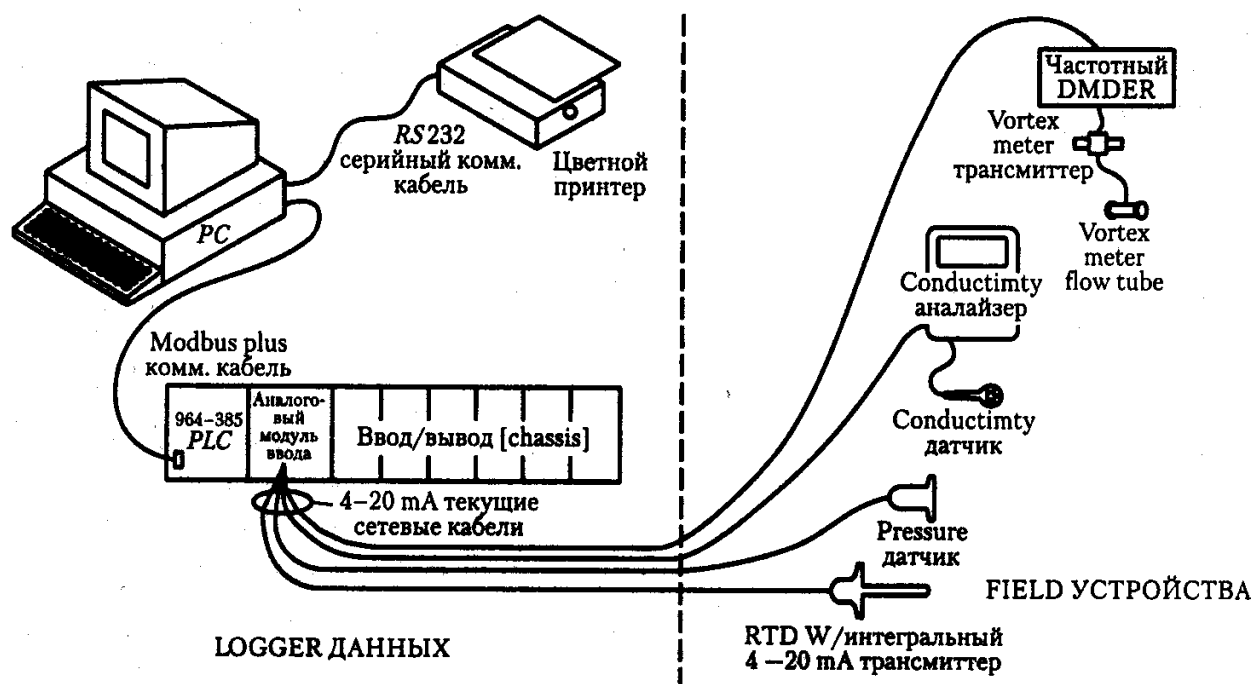


Рис. 15.6. Компоненты и схема подключения регистратора данных о температуре, давлении в напорной линии, проводимости и потоке, применительно к системе CIP

ется составление регистрационной диаграммы соотношения времени мойки и температуры ввиду того, что эффективность этой *по существу химической процедуры* определяется временем, температурой и концентрацией раствора.

Не менее важным фактором является *гидравлический*. Моющий раствор при необходимой для мойки температуре может застаиваться внутри системы рециркуляции в момент, когда в рециркуляционном насосе на продолжительный период времени образуется воздушная пробка. В конечном счете, подобное состояние влияет на работу подающего насоса. Тогда как регистратор температуры может сам предложить адекватный рециркуляционный период, регистрационная диаграмма и самописец с регистрацией температуры и давления нагнетания насоса помимо сведений, касающихся времени рециркуляции и температуры, позволяют персоналу оценивать и гидравлику системы.

Недавние исправления, внесенные в директивы FDA (Управления по контролю за пищевыми продуктами и лекарственными препаратами США) и имеющие отношение к используемым в молочной промышленности системам CIP, позволяют замену упомянутых регистрирующих устройств эквивалентными или более совершенными. На рис. 15.6 представлено схематическое отображение регистратора данных системы CIP, включающего готовые компоненты, используемые в сочетании со специальным программным обеспечением. Эта система может быть подогнана под любую из существующих рециркуляционных станций CIP, выступая при этом либо в качестве *независимой (автономной) системы*, либо в качестве ее расширения, базирующегося на программируемом логическом контроллере. Возможности регистрации необходимых данных включают в себя:

- графическую распечатку или экранное отображение с инициалами или паролем оператора(ов);

- текстовое отображение названия контура и режима работы (то есть мойка CIP, дезинфекционная обработка) с датой, временем запуска и номером станции CIP;
- мониторинг для отображения на экране действующего на настоящий момент цикла в режиме реального времени, показывающий цифровое отображение всех вносимых в график переменных с элементами оборудования, масштабом и описанием выполняемых на настоящий момент операций;
- список сообщений о неисправностях (аварийных сигналов), появившихся в процессе выполнения программы.

Для распечатки больших легко читаемых цветных копий желательно наличие цветного принтера. Система может распечатывать необработанные цифровые данные и сохранять данные в соответствии с существующими требованиями. Желательно также иметь возможность выборочного повторного отображения данных, вызываемых для каждого из контуров в любой из дней работы (для их последующей оценки). Шаблоны правильных программ могут сохраняться для сравнения с диаграммой только что завершенной программы.

#### 15.2.1.6 Питающие и рециркуляционные трубопроводы системы CIP

Стационарные питающие и рециркуляционные трубопроводы (CIPS/R) системы CIP являлись собой неотъемлемую часть ранних «автоматизированных» станций. При переработке молочных продуктов, а также в некоторых других подотраслях пищевой промышленности, в процессе производства возникает необходимость мойки танков и резервуаров с сырьем.

Рекомендации «Применение стационарных санитарных технологических трубопроводов и очистных систем (3 А)» (1986 г.) предусматривают: «Все соединения между контуром моющего раствора и контуром, в котором находится пищевой продукт, должны быть сконструированы таким образом, чтобы надежно предотвратить смешивание продукта с раствором в ходе технологического процесса». Наилучшего выполнения этого требования можно добиться за счет установки отдельных питающих и рециркуляционных трубопроводов. Такие «контактно-разрывные» соединения резервуаров с продуктом, технологических трубопроводов и магистралей подачи моющего раствора и его рециркуляции, как правило, состоят из съемных колен, U-образных калачей или Г-образных уток, располагаемых таким образом, чтобы предотвратить неправильные сочленения, или выполняются в виде одновременного соединения резервуаров с технологической магистралью и линией для моющего раствора.

#### 15.2.1.7 Движение рециркуляционного (возвратного) потока

Схематические изображения мойки CIP и системы CIPS/R, приведенные на рис. 15.1, были основаны на «напорном возврате». Хотя, по всей вероятности, такой «напорный возврат» является наиболее распространенным методом приведения в движение возвратного потока, существуют и другие известные методы, а именно:

**Безнапорный рециркуляционный поток.** Смывной, моющий и ополаскивающий растворы можно непрерывно удалять из подвергающегося струйной мойке резервуара исключительно за счет гидростатического напора со скоростью, равной скорости подачи раствора (в случае, если выпускные клапаны резерву-

ара и трубопроводы рециркуляционной системы обладают достаточной пропускной способностью для выполнения этой задачи). Этот метод, как правило, применяется только в том случае, если промываемый резервуар расположен выше рециркуляционного агрегата. Тем не менее дренаж самотеком представляет собой наиболее эффективный метод удаления остатков жидкости из трубопроводной сети. Рециркуляционный трубопровод должен находиться под постоянным наклоном от очищаемого резервуара к рециркуляционному агрегату (исключение составляют необходимые участки вертикальных подъемов от расположенного ниже коллекторного трубопровода и насосов к расположенным выше передающим магистралям).

**Рециркуляционный поток, поддерживаемый с помощью эжектора.** Данная концепция, отображенная на рис. 15.2, позволяет уменьшить объем воды, необходимый для заполнения рециркуляционного CIP-трубопровода, и обеспечивает чрезвычайно надежную работу и выполнение требований, касающихся равномерного распределения нагрузки на насосы.

**Рециркуляционный поток, основанный на работе эжектора.** Этот метод схож с вышеописанным с той лишь разницей, что при его применении на технологическом участке не размещаются рециркуляционные насосы. Возвратный CIP-трубопровод обычно имеет диаметр 3 дюйма, а ветви должны быть ограничены таким образом, чтобы потери давления не превышали 16–18 футов водяного столба, эквивалентных 16–18 дюймам водяного столба разрежения, создаваемого эжектором. Такая система может быть расширена за счет размещения станции CIP ниже напорных агрегатов, ограничивая таким образом положительный статический напор со стороны возврата.

**Максимальное давление.** При мойке напорных резервуаров для перемещения потока по возвратному трубопроводу по направлению к рециркуляционному агрегату станции CIP вместо обратного насоса или безнапорного потока может быть использовано максимальное давление. При использовании данной концепции предпочтительна потеря давления внутри рециркуляционного трубопровода менее 12–15 psi (фунт на квадратный дюйм). На возвратной линии может потребоваться использование клапана задержки, управление которым происходит за счет веса промываемого резервуара (при наличии динамометрического датчика) или же за счет датчика уровня в резервуаре безразборной мойки.

**Рециркуляционные насосы.** Малооборотные (1750 об/мин) рециркуляционные насосы способны обеспечить эффективность и надежность рециркуляционного потока в том случае, если возвратный (рециркуляционный) патрубок будет находиться под постоянным наклоном в направлении от очищаемого резервуара к входному каналу насоса, а также в случае наличия на входном канале насоса гидростатического напора в 18–24 дюйма. На более протяженных рециркуляционных магистралях или на рециркуляционных коллекторах системы CIP улучшения срабатывания можно добиться за счет размещения на входном канале насоса пневматического обратного клапана. Высокооборотные рециркуляционные насосы (3450 об/мин) подвержены возникновению воздушных пробок в большей степени, чем малооборотные. При проектировании



рециркуляционных систем потери давления на всасывающей стороне рециркуляционного насоса следует ограничивать до менее 10 футов водяного столба, несмотря на то что на входном канале насоса для закрытия пневматических обратных клапанов (в случае их использования) необходимо незначительное разрежение.

При проектировании рециркуляционных систем необходимо принимать во внимание уравнивание потока раствора, то есть регулировку слива рециркуляционного насоса с каждой части системы так, чтобы он был равен примерно полукратной подаче питающего насоса (для многотанковых систем многократного использования) и был достаточен для «наполнения» питающего насоса при избыточном давлении от 3 до 5 футов на дюйм (для однетанковых систем CIP однократного использования). Это достигается за счет задания соответствующих размеров лопастей насосов и напорных гидролиний, а в случае необходимости — и за счет монтажа ограничителей потока. Один рециркуляционный насос, как правило, в состоянии поддерживать от пяти до семи резервуаров, что объясняется ограничением на потери давления на стороне всасывания, а также трудностью обеспечения постоянного наклона от выходов резервуаров к входному каналу рециркуляционного насоса.

#### *15.2.1.8 Струйная мойка технологических емкостей, резервуаров хранения или технологического оборудования, не предназначенного для работы с жидкостями*

Успешность струйной мойки резервуаров хранения и технологических емкостей зависит от правильности их проектирования, а также надлежащего использования струйных форсунок.

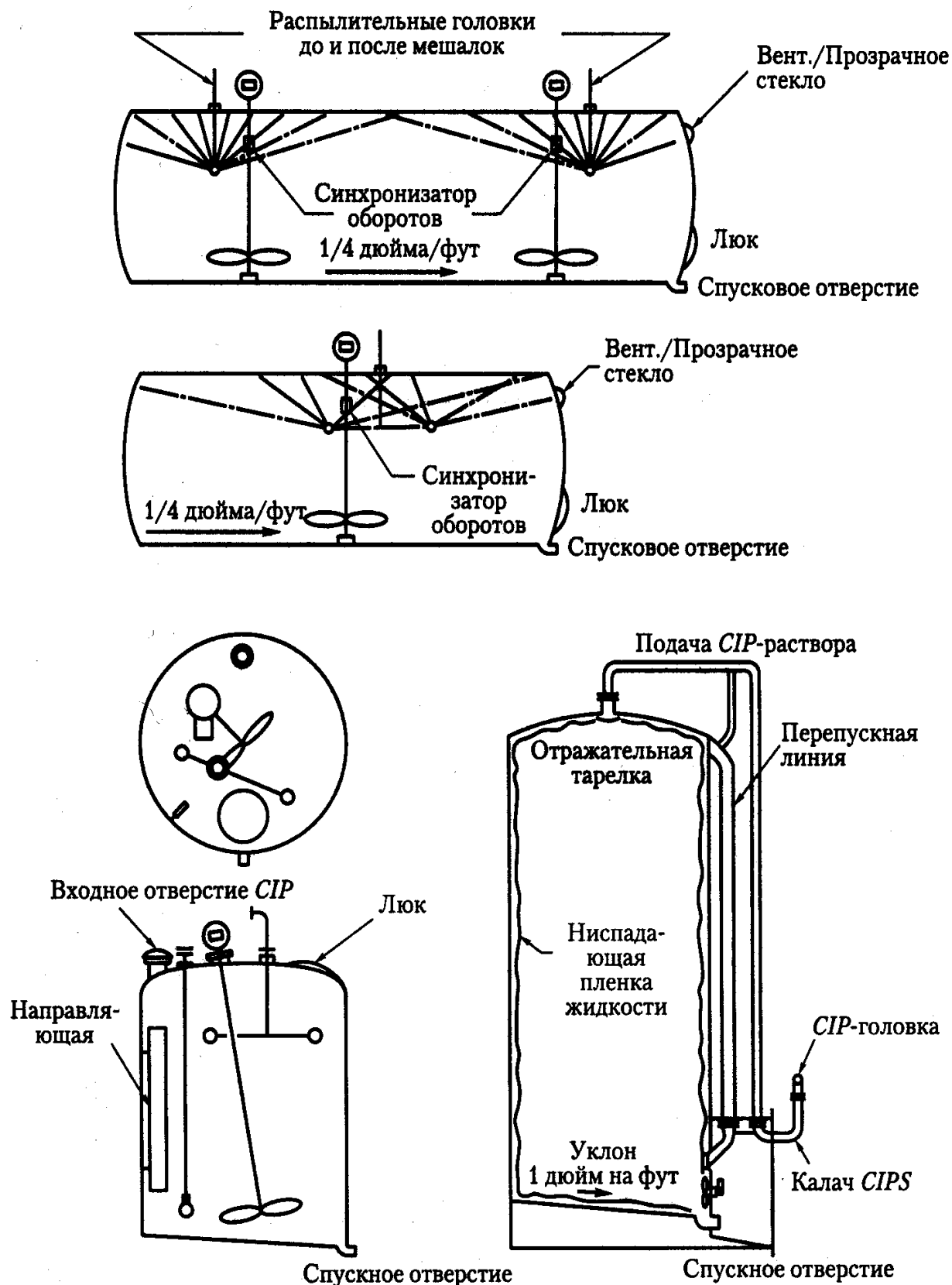
Предпочтение отдается стационарным форсункам с фиксированным шариком (по сравнению с поворотными и вибрационными форсунками). Их преимущества заключаются в следующем:

- отсутствие движущихся частей;
- возможность изготовления из нержавеющей стали;
- на их работу не оказывают существенного воздействия незначительные колебания давления в напорной линии;
- правильная их установка обеспечивает непрерывную вполне удовлетворительную работу;
- обеспечивается непрерывное распыление моющего раствора на всю площадь поверхности.

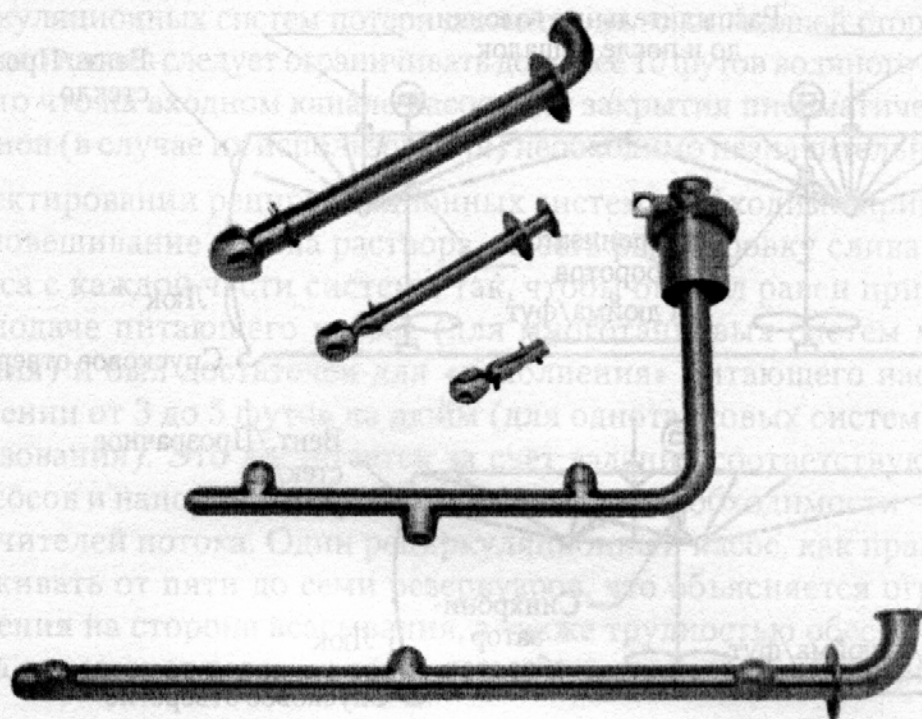
Форсунки с фиксированным шариком могут поставляться с различными характеристиками относительно расхода, давления нагнетания и покрытия смачиваемой поверхности. Опыт показывает, что достаточная мойка резервуаров цилиндрической и прямоугольной формы возможна при распылении от 0,2 до 0,3 гал/мин на кв. фут внутренней поверхности, причем площадь смачиваемой поверхности должна составлять не менее верхней трети резервуара (рис. 15.7). В случае наличия в резервуаре дополнительных элементов (нагревательной или охлаждающей спирали, мешалок и т. п.) для их охвата процессом мойки, возможно, понадобится использовать специальные способы распыления жидкости, что приведет к увеличению общего расхода.

Вертикальные резервуары силосного типа (рис. 15.7) могут быть надлежащим образом вымыты при расходе от 2,0 до 2,5 гал/мин на фут окружности резервуара.

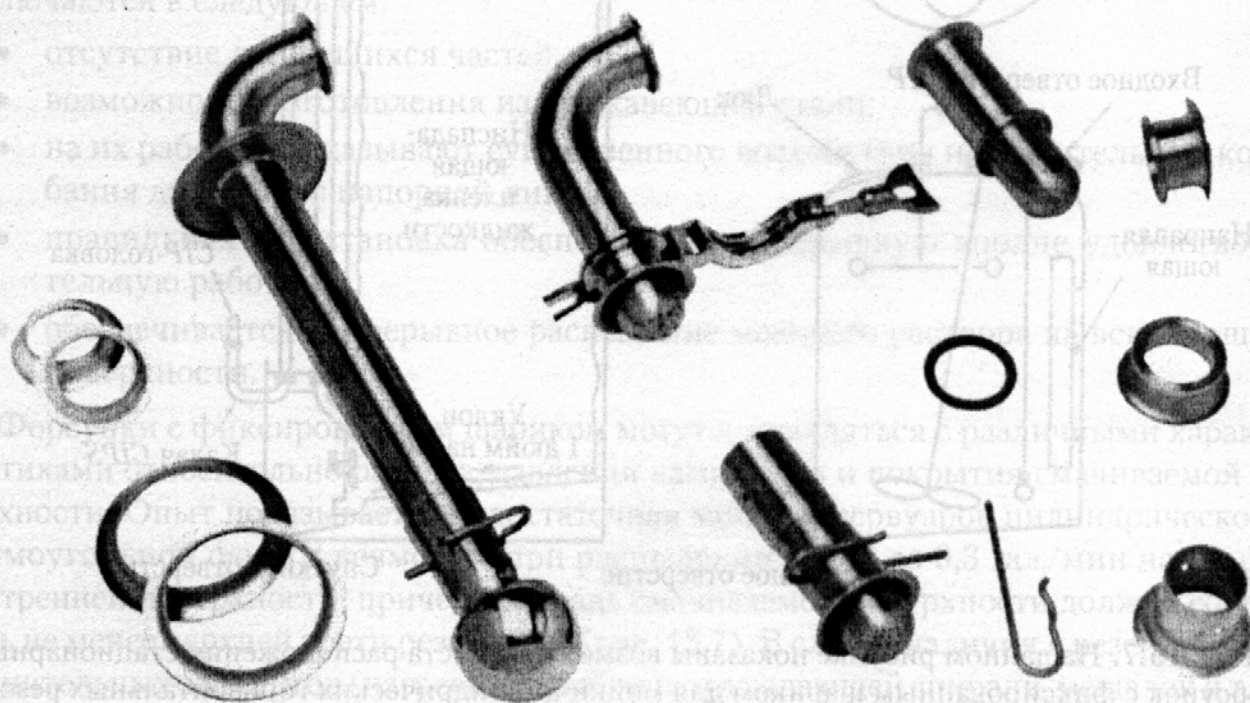




**Рис. 15.7.** На данном рисунке показаны возможные места расположения стационарных форсунок с фиксированным шариком для мойки цилиндрических горизонтальных резервуаров и технологических емкостей. Резервуары силосного типа, как правило, промывают при помощи незасоряющихся дисковых или тарельчатых форсунок, что позволяет использовать напорную магистраль станции CIP в качестве магистрали для повторного дренирования (как компонент защиты резервуара от переполнения)



**Рис. 15.8.** Стационарно закрепляемые форсунки поставляются в виде форсунок шарикового типа с просверленными отверстиями или трубчатых форсунок. Небольшая гидроприводная вращающаяся форсунка изображена в середине  
(С разрешения *Electrol Specialities Company*)



**Рис. 15.9.** Типовой ассортимент форсунок шарикового и пузырькового типов и фитингов для мойки систем переработки сухих продуктов  
(С разрешения *Electrol Specialities Company*)



Незасоряющиеся дисковые форсунки используются в резервуарах упомянутого типа по причине относительной сложности доступа к ним для периодической проверки и чистки. Критерий, соответствующий стандартам 3-А для установки силосных резервуаров на фундаментах вне производственного здания, включает в себя требование, согласно которому все ведущие к резервуару отверстия должны находиться на площади ниши, доступной с участка проведения санитарно-гигиенических мероприятий. При этом все напорные и возвратные трубопроводы, а также линии дренажа и перелива резервуара должны по гигиеническим соображениям заканчиваться в здании.

На рис. 15.8 приведена фотография нескольких стационарно закрепляемых форсунок с фиксированным шариком, а также трубчатые форсунки, а на рис. 15.9 — пузырьковые форсунки и фитинги наряду со стандартной шариковой форсункой. Их применение будет описано в следующем разделе.

Программы мойки резервуаров с использованием распылителей отличаются от программ мойки трубопроводов. Предварительное и последующее ополаскивание в большинстве случаев осуществляется за счет использования метода выбросов. Вода при этом сливается за счет трех или более выбросов продолжительностью от 20 до 45 с, и между такими последовательными выбросами резервуар полностью дренируется. При удалении осадка и пены такая процедура более эффективна, чем метод непрерывного ополаскивания и может быть осуществлена с использованием значительно меньшего количества воды.

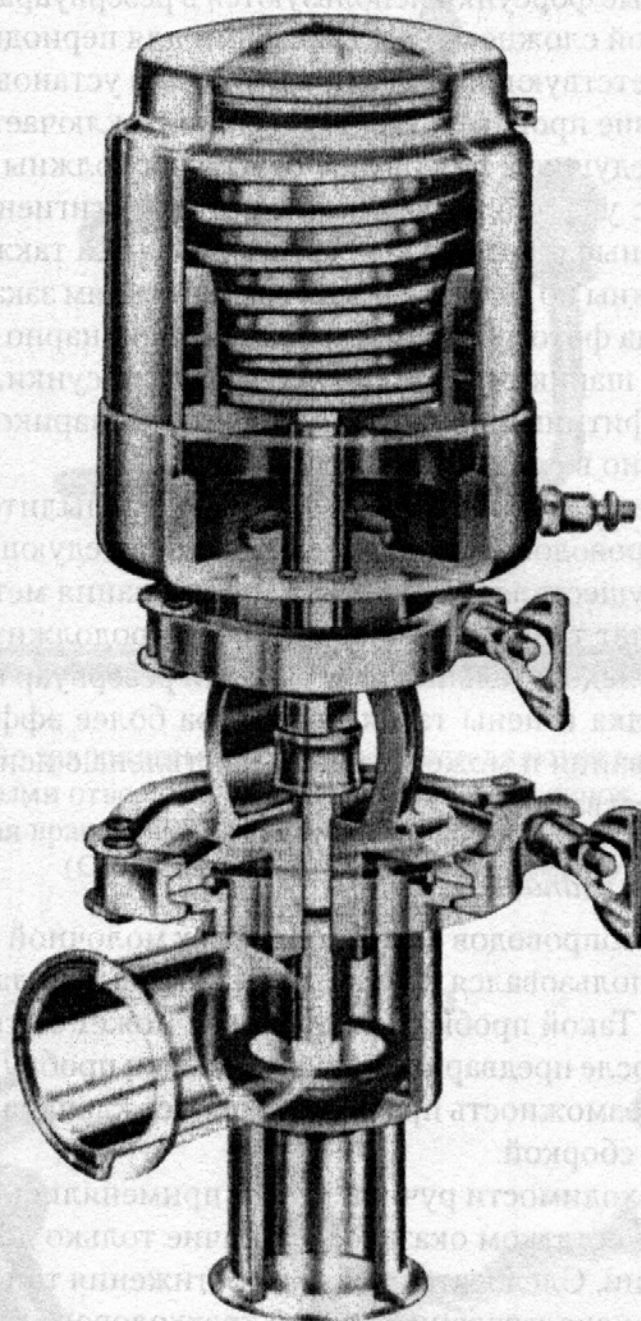
#### 15.2.1.9 Пневматические клапаны

До 1960 г. в системах трубопроводов на предприятиях молочной и пищевой промышленности чаще всего использовался конусный (пробковый) клапан двух- или трехходовой конфигурации. Такой пробковый клапан не может быть промыт безразборным способом, так что после предварительной промывки пробку (конус) необходимо снять, чтобы получить возможность промывки корпуса клапана и самой пробки (конуса) вручную перед их сборкой.

Для устранения необходимости ручной мойки применялись также клапаны мембранного типа, но их недостатком оказалось наличие только двухходовой отсечной (запорной) конфигурации. Следовательно, для достижения той же степени управления потоком, что и при использовании одного трехходового клапана, приходилось использовать три отдельных клапана. К тому же диафрагмы приходилось устанавливать почти в вертикальном положении (для обеспечения должного дренажа полости корпуса).

В последние годы в технологических процессах немолочной пищевой промышленности широкое распространение получили дроссельные тарельчатые (дисковые) клапаны. В работе [7] показано, что ни один из шести серийно выпускаемых дроссельных (поворотных) клапанов не обладал возможностью его полной очистки без специального технического ухода в процессе смоделированной эксплуатации на протяжении 1 года, причем в течение 6 месяцев все они (за единственным исключением) оказались подвержены сбоям в работе.

В упомянутой работе имеется ссылка на учебную памятку 1986 г., в которой говорилось о том, что «дроссельные клапаны необходимо монтировать таким образом, чтобы они были легко доступны и могли быть разобраны для проверки и обслуживания».



**Рис. 15.10.** Такой санитарно-гигиенический клапан компрессионного типа оснащается реверсируемым вентильным приводом. В процессе мойки CIP для очистки кольцевого уплотнения шток клапана должен «вибрировать»

(С разрешения Tri-Clover)

ния». Далее в работе утверждается, что ни один из проверенных клапанов упомянутому требованию не соответствовал.

Дроссельные и стандартные шаровые клапаны не предусмотрены для использования мойки CIP и в случае их включения в систему трубопроводов до завершения программы мойки связанного с клапанами оборудования эти клапаны следует промыть вручную. Тем не менее шаровой клапан с клетью (вид затвора регулировочного клапана) приемлем для механической мойки в том случае, если он спроектирован и установлен в соответствии со стандартом 3-A № 66-00 (1995 г.).



Наиболее приемлемым клапаном для применения в системе CIP является клапан компрессионного типа с подъемным штоком и запрессованной резиновой заглушкой (пробкой) или уплотнением, а также с тефлоновым кольцевым уплотнением на диске из нержавеющей стали (рис. 15.10). Кольцевые уплотнения используются в качестве уплотнения штока клапана, и конструкция систем трубопроводов должна обеспечивать возможность включения всех клапанных каналов в контур CIP. В этом случае используется процедура, устанавливающая последовательность срабатывания клапанов, в ходе которой клапаны должны действовать в нужной последовательности на протяжении всей программы мойки, заставляя воду проходить по трубам в различных направлениях. Каждый из клапанов на протяжении предварительного ополаскивания срабатывает два или три раза, в процессе мойки — четыре или шесть раз, и в ходе окончательного ополаскивания — три или четыре раза. Каждая из деталей клапанов, а также каждый участок системы трубопроводов подвергаются одинаковому механическому или химическому воздействию. Срабатывание клапана заставляет кольцевое уплотнение штока закачивать на участок уплотнения некоторое количество моющего и ополаскивающего раствора.

Если срабатывание пневматических клапанов используется на производствах пищевой промышленности в протяженных системах трубопроводов, то их конструкция должна позволять осуществлять мойку одной из технологических подсистем, в то время как другие используются в ходе технологического процесса.

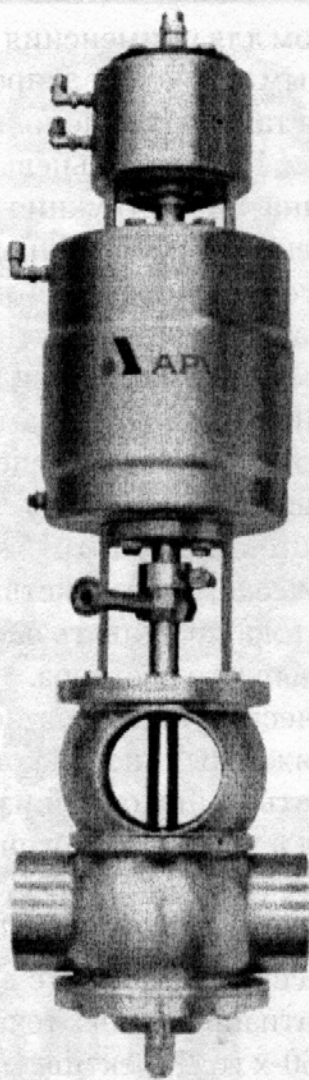
#### 15.2.1.10 Клапаны, обеспечивающие несмещиваемость сред

Пневматические клапаны компрессионного типа с возможностью их безразборной мойки стали применяться в автоматизированных технологических процессах молочной промышленности с начала 1960-х гг. Директивы FDA, равно как и стандарты 3-A, никогда не разрешали использования клапанов какого бы то ни было типа для отделения содержащих продукцию резервуаров или магистралей от резервуаров или магистралей с моющими растворами. Для подобного отделения упомянутые директивы и стандарты требовали использования конструкций, обеспечивающих наличие «контактно-разрывных» соединений.

Более двух десятилетий тому назад несколько европейских фирм выдвинули идею смесезащитных клапанов, которая подразумевала конструкцию и применение одного-единственного клапана, выполняющего те же самые функции, что и клапаны, срабатывавшие по хорошо известному принципу «двойного блокирования и стравливания». Конструкция такого клапана требует меньшего пространства, меньших затрат, а также может обеспечить его полную безразборную мойку. Такие смесезащитные клапаны получили широкое распространение в пивоваренной промышленности, а с недавних пор они стали использоваться также в некоторых технологических процессах немолочной пищевой промышленности, фармацевтике и биотехнологии.

На рис. 15.11 приведена фотография недавно представленного в США смесезащитного клапана, разработанного в соответствии со стандартами 3-A и требованиями FDA и имеющего полноразмерный выпускной клапанный канал. Такой клапан включает в себя модуль подъема седла, размещенный на вентильном приводе, а также клапанный канал, по которому промывочный, моющий и ополаскивающий ра-

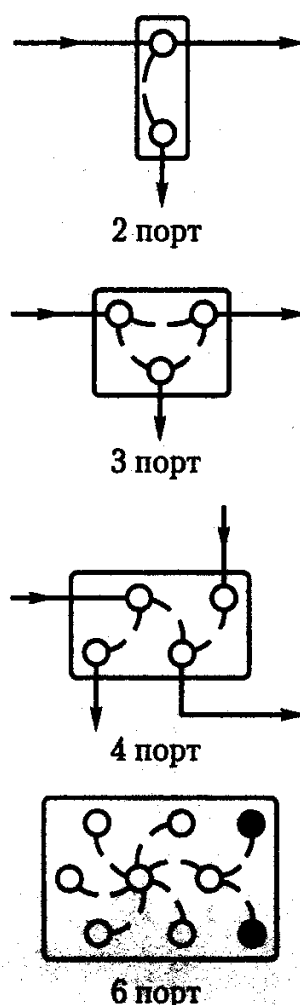




**Рис. 15.11.** Такой смесезащитный клапан оборудован модулем подъема седла (вверху) и сливной полостью (посередине). Любая утечка, вызванная неисправностью одного из кольцевых уплотнений, выводится наружу за счет полноразмерного выпускного канала (С разрешения APV)

створы передаются к проходу между внутренним и внешним штоками. Эти штоки управляют движением дисков клапана к форсунке, размещенной на внешнем штоке в пределах участка выпускного канала.

Когда клапан закрыт, верхний и нижний диски и уплотнения разделяются, обеспечивая проход утечек между обоими седлами; выход жидкости наружу осуществляется через выпускной канал большого диаметра. При подаче рабочего воздуха на вентильный привод верхний диск сначала соприкасается с уплотнением на диске выпускного канала, закрывая проходы к нему. Непрерывное перемещение в открытое положение обеспечивает прохождение потока между верхним и нижним корпусами, причем подвижный канал для выпуска утечек уплотнен с нижним корпусом посредством манжет. В процессе мойки CIP соответствующие растворы могут подаваться на участок выпускного клапана и легко выводиться в атмосферу (в большинстве случаев предусмотрена специальная система слива). Слив осуществляется без оказания давления на уплотнение верхнего седла, результатом которого может стать



**Рис. 15.12.** Панели с калачами могут использоваться в двух-, трех- (треугольник), четырех- (ромб) и шестиканальной (шестиугольник) конфигурации, или же в качестве основы для проектирования более сложных конструкций

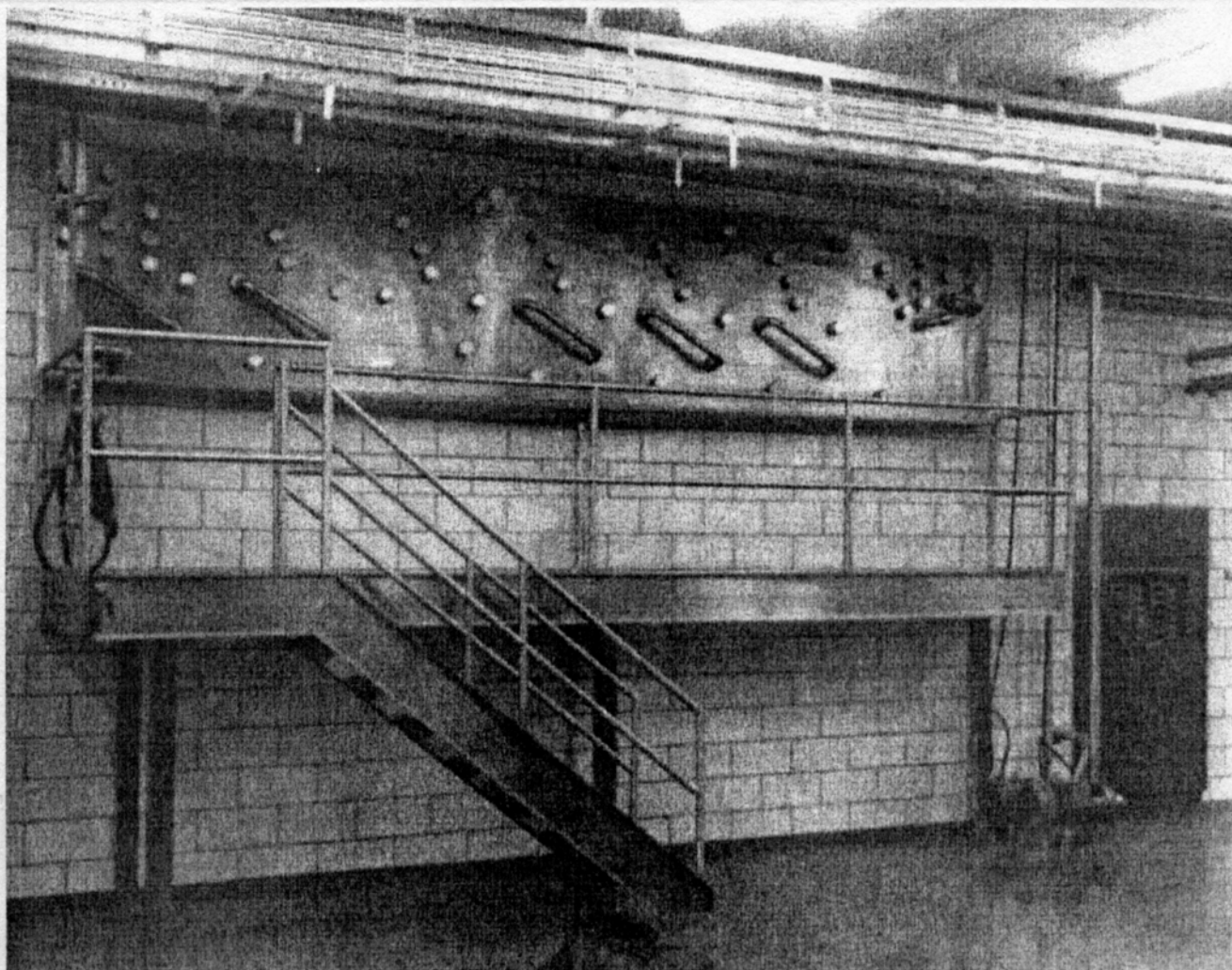
утечка или загрязнение продукта моющими растворами. Слив возможен даже в том случае, если в верхнем корпусе содержится продукт. Поставляемый дополнительно модуль подъема седла обеспечивает возможность индивидуального смещения одного из двух дисковых уплотнений с полости верхнего или нижнего корпуса в сторону выпускного канала (а также поставляемые дополнительно) датчики «близости» позволяют определить различные положения седла клапана.

#### 15.2.1.11 Переходные U-образные калачи

U-образные калачи используются на многих предприятиях молочной промышленности для обеспечения максимальной гибкости производства, и возможности осуществления управляемой санитарно-гигиенической обработки посредством механической или химической мойки с гарантией целостности отдельных контуров прохождения потоков продукции и моющих и/или стерилизующих растворов.

На рис. 15.12 приведены четыре варианта панелей с небольшими калачами. За исключением двухканальной компоновки все другие (с внесенными небольшими изменениями) основываются на треугольной компоновке ( $120^\circ$ ), четырехканальной ромбовидной компоновке или же на более сложной шестиканальной





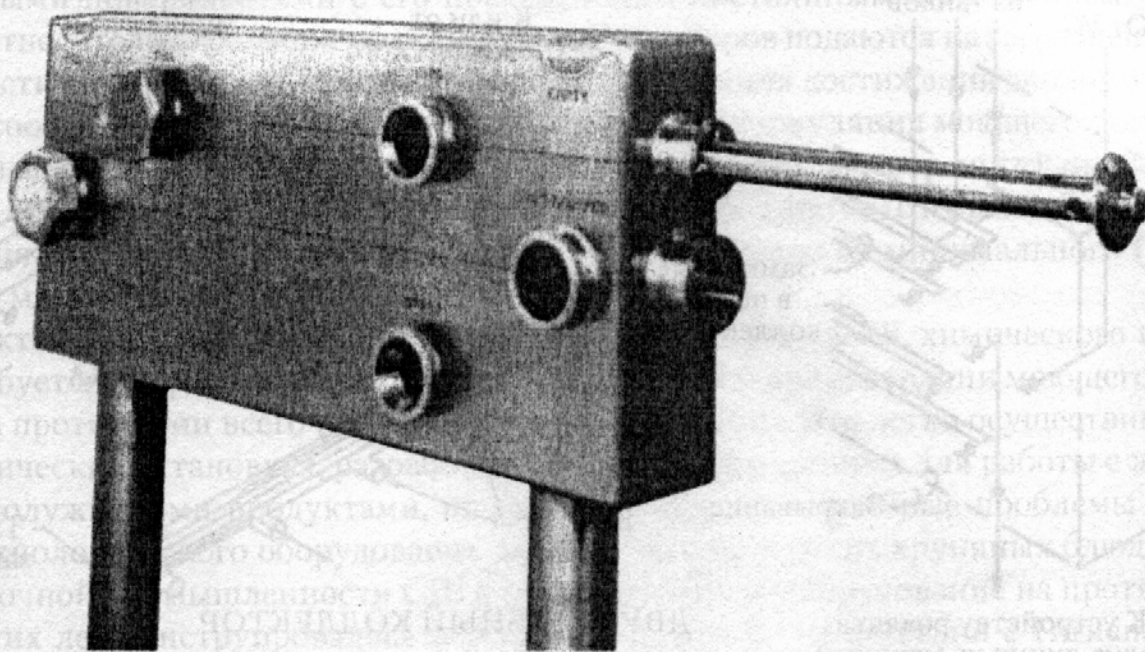
**Рис. 15.13.** Подобная панель питания аппарата розлива позволяет запитывать любой (или все) аппараты розлива от любого из четырех автоматизированных резервуаров или же посредством U-образных сочленений с любым резервуаром побочного (промежуточного) продукта через четыре коллектора. Ни одна из рабочих конфигураций не допускает смешения продуктов и растворов, предназначенных для мойки CIP  
(С разрешения *Electrol Specialties Company*)

компоновке, которая широко используется в многообразных формах для подсоединения нескольких основных каналов ко множеству других посредством U-образного калача стандартной длины.

На рис. 15.13 приведена фотография панели питания агрегата розлива на крупном молокозаводе. Такая панель позволяет подсоединить любой из семи аппаратов розлива:

- к группе клапанов, поочередно управляющих потоком от шести крупных резервуаров с продуктом;
- к любому из шести резервуаров с побочным продуктом через шесть верхних коллекторов;
- к коллектору *CIPS*.

Нижние коллекторы включают в себя контур коллектора *CIPR*, который, в свою очередь, объединяет шесть резервуаров, группу клапанов, всю систему трубопрово-



**Рис. 15.14.** Для предотвращения тупиковых ответвлений (концов) коллекторы этого резервуара оборудованы внутренними трубами (одна частично выдвинута)  
(С разрешения *Electrol Specialities Company*)

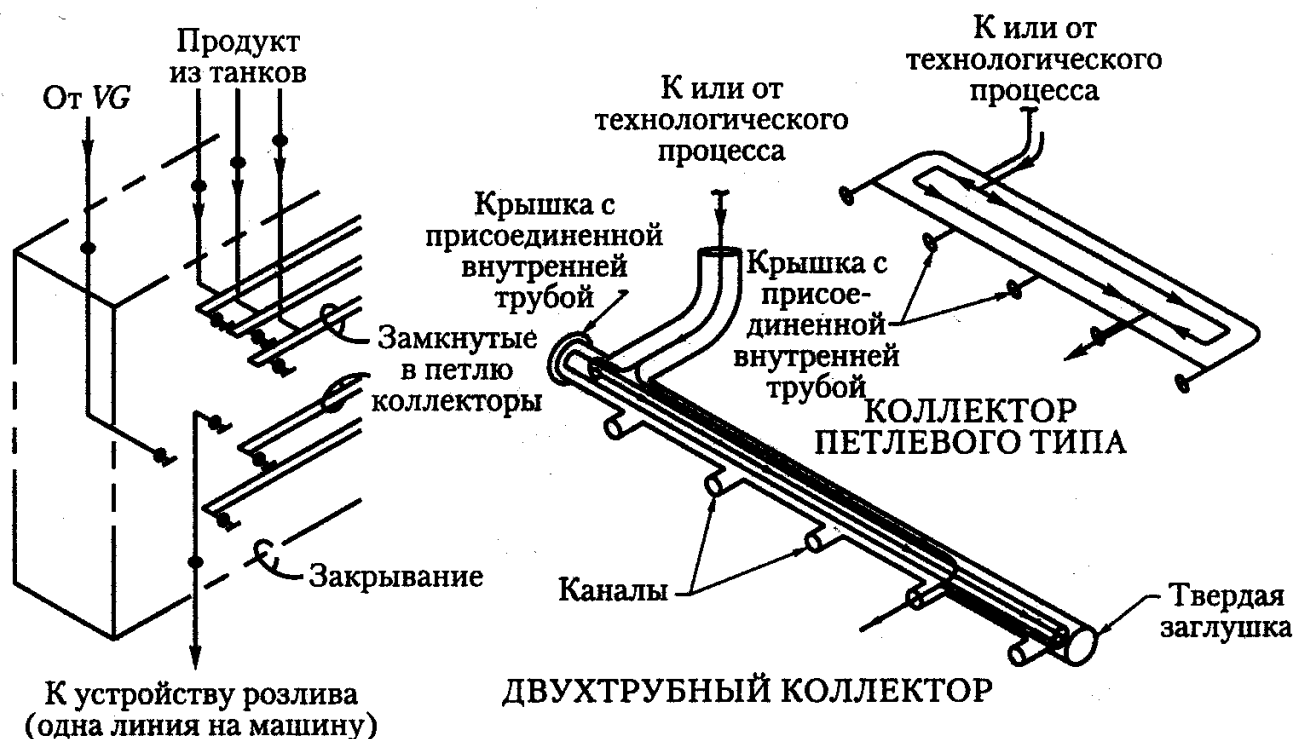
дов, а также такое количество аппаратов розлива, которое имеется в отдельном контуре. В работах Зиберлинга конечный результат этой проектной концепции понимается как «расширенное производство жидкого молока с улучшенным сроком хранения», то есть имеется в виду молочное производство, способное выпускать готовую продукцию с повышенным качеством хранения за счет существенного улучшения контроля за санитарно-гигиенической обработкой, проводимой после процесса пастеризации при использовании стандартных технологий термообработки и упаковки.

Блок подсоединения резервуара, показанный на рис. 15.14, был сконструирован для подсоединения выпускного клапана резервуара к следующим каналам:

- клапанному каналу наливного трубопровода;
- клапанному каналу питающей линии (трубопровода) аппарата розлива;
- клапанному каналу *CIPR*.

Для снабжения контура питающего трубопровода аппарата розлива был добавлен канал *CIPS*. В данной панели имеются также короткие внутренние коллекторы.

При использовании коллекторов на панелях с калачами в соответствии с приведенным выше описанием особое внимание следует уделять отсутствию тупиковых ответвлений. Ответвление Т-образного сочленения (например, канал от коллектора к обшивке панели) должен быть ограничен примерно полуторным диаметром труб, что позволит осуществлять рециркуляционную мойку при обычных скоростях потока. Коллекторы могут представлять собой двухтрубную или петлевидную конструкцию (рис. 15.15), которые обеспечивают постоянное перемещение растворов на всех участках системы. Оконечная часть панели с калачами, показанная на рис. 15.15, представляет собой пример внутреннего трубопровода и конструкции обводных тру-



**Рис. 15.15.** Для устранения тупиковых ответвлений должны быть сконструированы коллекторы переходных панелей с калачами. Справа изображены коллекторы петлевого типа и трубчатые коллекторы. Приведена также схема внутреннего трубопровода панели

бопроводов, используемых на питающей панели аппарата розлива, приведенной на рис. 15.13, а двухтрубный коллектор (рис. 15.15) является примером коллекторов для панели резервуара, изображенной на рис. 15.14.

Использование вручную устанавливаемых U-образных калачей для выполнения технологических сочленений и сочленений системы CIP в высокоавтоматизированной системе может потребовать некоторых устройств контроля целостности отдельных линий (каналов) перемещения потока.

На практике это осуществляется за счет установки постоянных магнитов в корпусах из нержавеющей стали, привариваемых к центру U-образного сочленения. После этого для определения наличия или отсутствия U-образного калача между любой выбираемой парой каналов могут быть использованы датчики приближения, расположенные за обшивкой переходной панели. Базу данных компьютера или программируемого логического контроллера разрабатывают в расчете на включение «разрешенного» или «необходимого» сочленения для каждой установленной линии перемещения потока, необходимой для осуществления технологического процесса, мойки или стерилизации.

### 15.2.2 Критерии для проектирования оборудования для мойки CIP

Применяемая в настоящее время в отраслях, имеющих дело с жидкими и полужидкими продуктами, мойка CIP в сущности является химическим процессом. Технологическое оборудование и все соединительные трубопроводы спроектированы таким



образом, чтобы позволить моющему раствору войти в тесный контакт со всеми загрязненными поверхностями с его последующим постоянным обновлением. Поскольку относительно большие объемы моющих растворов подаются на загрязненные поверхности на периоды от 5 мин до 1 ч (или более), то для достижения экономической целесообразности очень важное значение имеет рециркуляция моющего раствора. Промывная и ополаскивающая вода, а также моющий раствор могут прокачиваться по системе трубопроводов со скоростью от 1,5 до 5 футов/с и выше. Давление нагнетания, подаваемое на форсунки, может варьироваться от минимального (12–15 psi) до максимального (60 psi).

Эффективная мойка при использовании этого, по сути своей, химического процесса требует поддержания необходимой температуры и концентрации моющего раствора на протяжении всего рециркуляционного периода. Это легко осуществимо в технологических установках, разработанных и предусмотренных для работы с жидкими и полужидкими продуктами, но способно создать некоторые проблемы при мойке технологического оборудования для изготовления сухих крупяных блюд.

В молочной промышленности США технологическое оборудование на протяжении многих лет конструировалось и устанавливалось в соответствии с Гигиеническими стандартами 3-А или Правилами Международной Ассоциации санитарии и гигиены по молочным и другим пищевым продуктам и охране окружающей среды, Службы здравоохранения и Комитета молочной промышленности. Некоторым производителям других пищевых продуктов и напитков эти стандарты представлялись излишне жесткими. Вероятно, что осуществление механической или химической мойки делает некоторые требования, например, относительно чистоты поверхностей или возможности проведения проверок уже не такими важными, как прежде, когда оборудование приходилось мыть вручную.

Большая часть способов проектирования основана на длительном практическом опыте, и в этой главе мы дадим их обзор прежде всего для тех, кто связан со спецификациями, закупкой и проектированием оборудования для будущих технологических процессов по обработке немолочных пищевых продуктов, причем особое внимание при этом мы обратим на технологические процессы обработки нежидких продуктов.

### 15.2.2.1 Танковые резервуары

Критерии, применимые для проектирования горизонтальных резервуаров (как цилиндрической, так и прямоугольной конструкции), во многом в равной степени применимы к проектированию и конструированию мешалок, накопителей, циклонов, а также любых других «резервуаров», используемых в технологическом процессе. Предлагаемые критерии включают:

- наклон дна плоских резервуаров от задней к передней стороне (или более точно — от высшей точки к низшей) должен составлять не менее  $j$  дюйма/фут, а наклон от боковины к середине —  $S$  дюйма/фут, что позволяет обеспечивать приемлемое прохождение потока по поверхностям для удаления взвешенных твердых частиц;
- плоские верхние поверхности должны находиться под наклоном примерно в  $S$  дюйма/фут от центра к боковым стенкам, что дает возможность обеспечивать непрерывный отток воды, распыляемой на эти поверхности, к боковым стенкам;

- на всех поворотах (как горизонтальных, так и вертикальных) желательно обеспечить минимальный радиус закругления в 1 дюйм;
- резервуар должен быть оборудован постоянным воздушным клапаном для защиты от любых изменений давления или разрежения, являющихся результатом нагревания или охлаждения, связанного с процессом мойки;
- для мешалок (миксеров) следует применять механические уплотнения и в случае необходимости использования опорных подшипников последние должны обеспечивать лишь точечный или линейный контакт и служить скорее направляющими, а не опорами;
- термопары или *RTD* устанавливаются для определения температуры только поверхности резервуара, представляя собой с точки зрения возможности мойки наиболее предпочтительный вариант.

#### 15.2.2.2 Сушилки и печи

При модификации и совершенствовании конструкций сушилок и печей возможности осуществления мойки CIP, кроме названных выше пунктов, следует учитывать следующее:

- по возможности следует исключить из конструкции дверцы и соответствующие уплотнения;
- узлы (секции) с болтовыми соединениями допускаются в том случае, если конструкция сочленения или уплотнения обеспечивает наличие достаточно гладкопроходной внутренней поверхности, на которой отсутствуют щели или выпуклости;
- нижние и верхние поверхности должны находиться под упоминавшимся ранее уклоном с минимально возможным радиусом закругления;
- на всех местах слива необходимо предусмотреть возможность для установки клапанов и осуществления сочленений, предусмотренных для рециркуляционной магистрали CIP;
- соединительная система каналов, направленная к вентиляторам, нагревателям, циклонам и от них, должна быть по возможности короткой и включена в систему CIP, причем к этой части машины следует применять критерии, описанные ниже в разделе «Система трубопроводов».

#### 15.2.2.3 Система трубопроводов

Что касается конструкции и монтажа трубопроводов системы CIP и в некоторой степени — конструкции трубопроводов, используемых для перемещения продукта под действием воздуха или силы тяжести, можно отметить следующее:

- для неразъемных соединений в системах передачи, изготовленных из нержавеющей стали, наиболее подходят сваренные в среде инертного газа сочленения;
- сочленения зажимного типа внутри конструкции системы CIP допустимы для практически неразъемных соединений. В широком смысле слова, проектирование системы CIP должно обеспечивать: а) совокупность сочленений и уплотнений, способствующих выравниванию соединительных фитингов; б) конст-



рукцию, при которой уплотнение формирует наличие гладкопроходной внутренней поверхности; в) конструкцию, которая создает давление на каждую из сторон уплотнения на внутренней поверхности, что помогает избегать скопления продукта в трещинах тех сочленений, «водонепроницаемость» которых достигается иным способом;

- все элементы системы трубопроводов должны находиться под наклоном по отношению к местам слива (от 1/16 до 1/8 дюйма/фут);
- опорная система трубопроводов и каналов должна представлять собой жесткую конструкцию, способную обеспечить их наклонное положение и выравнивание в любом эксплуатационном режиме и при любом режиме мойки;
- нежелательно наличие ответвлений и тупиковых концов, а все обязательные тройниковые и прочие ответвления следует размещать в горизонтальном положении и ограничивать по длине таким образом, чтобы она составляла не более 1,5 диаметра трубы. Наличие вертикальных тупиковых концов при работе с жидким продуктом нежелательно по той причине, что захваченный воздух будет служить помехой моющему раствору на его пути к верхнему фитингу;
- конструкция трубопроводов должна обеспечивать возможность максимального включения ее компонентов в контуры системы *CIP*. Рекомендуется установка пяти или шести небольших перемычек, которые избавляют от необходимости снятия и мойки вручную коротких участков труб. Механическая или химическая мойка гораздо более тщательна и проще в управлении, чем ручная.

#### 15.2.2.4 Конвейеры

В технологических процессах пищевой промышленности, где используется оборудование, подлежащее мойке *CIP*, применяется большое количество конвейеров, в число которых входят ленточные, винтовые и ковшовые пневматические конвейерные системы. Ленточные, а также большие винтовые и ковшовые конвейеры оборудуются защитными кожухами или же монтируются в корпусах, что позволяет эффективно использовать различные распылительные устройства. В свою очередь, корпуса должны быть сконструированы в соответствии с изложенными выше критериями для танковых резервуаров. Примеры удачного использования конвейеров приводятся в следующем разделе.

Примеры конструкции и монтажа, использование которых обеспечило удачное применение мойки *CIP*, приведены на рис. 15.16.

Следует учитывать: 1) наклон от центра к кромке —  $j$  дюйма/фут; 2) наклон от центра к сторонам —  $S$  дюйма/фут (верх и низ); 3) радиус угловых изгибов; 4) тип выходного отверстия для увеличения эффективности работы рециркуляционного насоса *CIP*; 5) сочленение рециркуляционного трубопровода мойки *CIP* поглощающего типа, при помощи которого устраняются застойные воды (лужи) на дне резервуара; 6) установку пузырьковых форсунок в присоединенной сети трубопроводов. На отдельных частях рисунка (А) и (В) показаны методы монтажа форсунок в эмалированных резервуарах или облицованных тефлоном трубопроводах. На части ри-



ности достижения высокой степени чистоты оборудования. В 1981 г. в работе [23] был опубликован отчет о возможностях мойки поверхностей из нержавеющей стали с разной отделкой (чистотой).

Мойка *CIP* с успехом применяется для различного оборудования, изготовленного не из нержавеющей стали. Особенно это касается оборудования пивоваренной промышленности. Бродильные чаны и резервуары хранения, изготовленные из малоуглеродистой стали с эпоксидным покрытием, доказали свою надежность в эксплуатации при условии, что их конструкция и применение исключают частый доступ к ним персонала, предотвращая таким образом их физическое повреждение. В Англии мойка *CIP* с успехом применялась для мойки медных бродильных чанов и резервуаров хранения, а также бетонных резервуаров с эбеновым покрытием и эмалированных конструкций.

Все технологическое оборудование должно быть сконструировано таким образом, чтобы моющий раствор входил в соприкосновение со всеми поверхностями, контактирующими с продуктом. Желательно, чтобы оборудование могло удерживать эти растворы, что помогает избежать потерь, предотвращать повреждение другого оборудования и нанесение вреда здоровью обслуживающего персонала, работающего в непосредственной близости. Причинами нанесения ущерба оборудованию и здоровью персонала могут стать разбрызгивание, лужи или утечка. В процессе конструирования системы требованиям, предъявляемым к мойке оборудования, следует уделять столько же внимания, сколько и требованиям, касающимся собственно технологического процесса.

## 15.3 Варианты применения

### 15.3.1 Мойка *CIP* при производстве жидких пищевых продуктов

#### 15.3.1.1 Автоматизированная система трубопроводов через коллекторы

На рис. 15.17 изображена простая система из трех резервуаров, небольшого числа трубопроводов и станции *CIPS/R*, разработанная для полной мойки *CIP*, осуществляемой от соответствующего стационарной станции. Такая технология обеспечивает приемку растительного масла и жидкого сахара (или кукурузного сиропа) цистернами с автономными насосами, способными подать все содержимое цистерны или его часть по шлангу на панель с калачами *PHS 1*, расположенную вдоль внешней стены. Подача масла осуществляется через отдельную магистраль, ведущую к резервуару *OIL 1*, через коленчатое сочленение к форсунке. В резервуары *SUG 1* и *SUG 2* посредством обычной магистрали, ведущей на пневматический клапан, управляющий сливом в выбранный резервуар, могут быть поданы два различных вида сахара. Станция *CIP* связана с системой трубопроводов и резервуарами посредством подводящего *CIP*-трубопровода, ведущего к четырем распределительным клапанам над моечной станцией.

Один из клапанов осуществляет подачу на моечную станцию, после чего установка соответствующего *U*-образного калача в определенное положение обеспечивает



продолжение передачи потока на форсунку в нужном резервуаре. Подключение выхода из резервуара также осуществляется посредством U-образного калача, идущего либо на питающий насос, либо на коллектор *CIPR*.

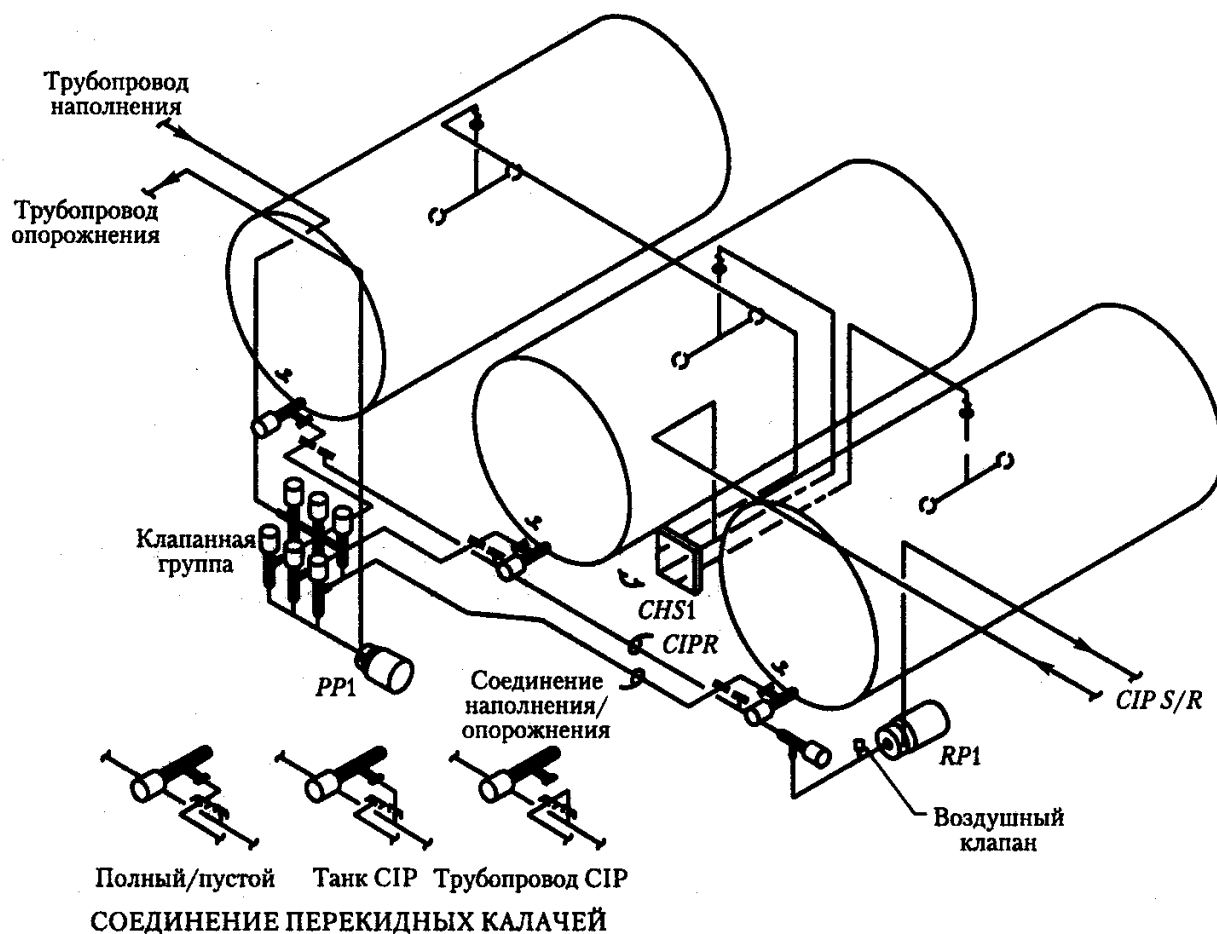
Второй клапан *CIPS* подсоединен к концу *CIPR* на резервуаре *SUG 1* и представляет собой промывочную магистраль *CIPR*. Для предотвращения тупикового отвления внутри коллектора *CIPR* при промывке резервуаров *SUG 2* или *OIL 1*, а также контура передающей магистрали *AB* на протяжении всей программы мойки *CIP* этот клапан открывается в течение каждой минуты на 3–5 с. Это позволяет осуществить предварительное ополаскивание, мойку и окончательное ополаскивание этой части коллектора *CIPR*, в котором в противном случае по окончании программы содержалась бы смесь первого подлежащего промывке продукта и различных растворов, посредством которых осуществляется мойка *CIP*. Небольшой схематически изображенный контур резервуара *TF* отображает непрерывный поток *T* через моечную станцию на форсунку *OIL 1* и рециркуляционный поток от резервуара к коллектору *CIPR*. Прерывистый поток *F* управляется промывочным клапаном, который в открытом состоянии обеспечивает уменьшение распыления, поддерживая таким образом постоянную скорость рециркуляции, контролируемой при помощи измерителя вихревого потока *VM* и клапана управления потоком *FCV*. Подобным способом может быть вымыт каждый из трех резервуаров после их опорожнения.

Процесс осуществляется за счет насоса подачи масла *PP1* и насоса подачи любого из двух видов сахара *PP2* с их доставкой по двум параллельным магистралям к нужной точке осуществления последующего этапа технологического процесса. По окончании подачи, когда в резервуарах продолжают находиться компоненты, передающие трубопроводы и насосы могут быть промыты за счет отсоединения каждого из резервуаров от соответствующей дренажной линии и перемещения U-образного калача для соединения подающего канала передающего коллектора с коллектором *CIPR*. Два переносных калача на клапанах управления сливом перемещаются на сочленение *CIPS* (для обеспечения противотока по передающим магистралям и насосам к коллектору *CIPR* в целях использования общей линии *CIPR*). При мойке получающегося контура магистралей *ABF* поток *CIPS* будет направляться от распределительного клапана технологической линии в качестве потока *AB*, последовательно проходя затем по магистралям передачи сахара *A* и передачи масла *B*. Промывочный клапан рециркуляционного потока *CIPR*, как уже было показано выше, будет открываться в определенных промежутках, позволяя таким образом потоку *F* осуществлять промывку конца коллектора *CIPR* и неразъемное сочленение промывочной магистрали.

Приемная магистраль промывается независимо после каждого использования за счет подачи на *PHS1* с последующим промыванием магистралей и подачей на сочленения заполнения резервуаров, где съемные калачи размещены на рабочих линиях *CIP* в целях продолжения потока на коллектор *CIPR*.

Несложные приемы, приведенные на рис. 15.17, могут быть использованы в любой комбинации систем трубопроводов и резервуаров для:

- 1) изоляции продуктов в резервуарах и трубопроводах от промывочных, моющих и ополаскивающих растворов, используемых в процессе мойки *CIP*;



**Рис. 15.18.** Различные варианты сборки клапанов компрессионного типа предоставляют возможность использовать для трех резервуаров два наполнительных и один сливной трубопровод. Съемные калачи обеспечивают разделение технологического процесса и мойки CIP

- 2) обеспечения абсолютной свободы тупиковых ответвлений системы трубопроводов CIPS/R;
- 3) струйной мойки резервуаров с обрабатывающим раствором;
- 4) мойки продуктовых трубопроводов под давлением.

#### 15.3.1.2 Конструирование систем трубопроводов с группами клапанов для автоматизированных технологических процессов

Традиционное применение в молочной, пивоваренной и многих других подотраслях пищевой промышленности пневматических клапанов в системе трубопроводов, поддающихся мойке CIP, изображено на рис. 15.18. Показанные на нем системы трубопроводов обеспечивают возможность заполнения, опорожнения и мойки трех резервуаров при помощи группы клапанов и насоса передачи продукта PP1. Приведенная на рис. 15.18 система типа «заполнение снизу–опорожнение снизу» работает следующим образом:

- 1) В ходе производственного цикла съемный калач на выпускном клапане каждого из резервуаров подключается к наливной или опорожняющей магистрали (от

резервуара к группе клапанов). Резервуар может заполняться или опорожняться при автоматическом управлении (при условии правильного использования технологических клапанов и насосов).

- 2) Для очистки резервуара: а) технологический поток прерывается; б) съемный калач устанавливается между выпускным клапаном резервуара и рециркуляционной линией *CIP* и в) концевая заглушка, снятая с рециркуляционной магистрали, используется для того, чтобы временно перекрыть магистраль заполнения/опорожнения. При смене сочленений эти фитинги необходимо промыть и почистить. В этой конфигурации резервуар изолирован от системы технологических трубопроводов посредством перекидного калача. U-образный калач на моечной станции размещается так, чтобы моющий раствор подавался на соответствующий распылитель.
- 3) В конце производственного цикла, когда имеется вероятность наличия остатков продукта в резервуаре, съемный калач вновь моют вручную, а затем размещают таким образом, чтобы подсоединить магистраль заполнения/опорожнения к рециркуляционной линии *CIP*, которая теперь используется в качестве рабочей соединительной линии системы *CIP*. Концевая заглушка размещается на выпускном клапане резервуара, что предотвращает загрязнение или потерю продукта (причиной чему может служить неправильное срабатывание этого клапана в момент, когда резервуар не подсоединен к системе технологических трубопроводов).
- 4) При мойке резервуаров выпускной клапан резервуаров должен «пульсировать», чтобы обеспечить промывку кольцевого уплотнения штока клапана. Это, как правило, выполняется в процессе дренажа, следующего за предварительной промывкой, мойкой раствором и заключительным ополаскиванием.
- 5) При промывке магистралей наполнительные и выпускные клапаны в группе клапанов должны быть расположены так, чтобы обеспечить управление потоком на каждом участке системы соединительных трубопроводов, а также мойку кольцевого уплотнения штока клапана.

Опыт показал, что в ходе предварительной промывки необходима манипуляция клапаном от трех до четырех раз, в процессе мойки раствором — от четырех до шести раз, и в ходе последующего и окончательного подкисленного ополаскивания — также от четырех до шести раз.

Система для отделения магистралей заполнения от магистралей опорожнения (см. рис. 15.18) может быть расширена за счет монтажа отдельной группы клапана заполнения. Дополнительный трубопровод заполнения может быть подсоединен к коллектору *CIPR* для мойки с использованием соединительных линий системы *CIP*, как уже было показано на рис. 15.17. Несмотря на то что дополнительные клапаны заполнения увеличивают капитальные затраты, объем работы оператора и вероятность повторного загрязнения после мойки, такие конструкции необходимы в том случае, если большое значение имеет мойка трубопроводов, управляющих заполнением и опорожнением резервуаров, отдельно от системы трубопроводов, опорожняющих резервуары.

### 15.3.1.3 Конструирование и монтаж систем трубопроводов CIPS/R (подача/возврат)

При монтаже систем трубопроводов, соответствующих вариантам применения, изображенным на рисунках 15.17. и 15.18, следует учитывать следующие правила конструирования:

- распределительные клапаны CIPS (подачи) следует размещать в наивысшей точке так, чтобы дренаж трубопровода происходил в обратном направлении на станцию CIP и вперед к нижней точке контура, а затем к полу через CHS1;
- участок, идущий от CIPS к CHS1, должен быть наклонен вниз или же, если моечная станция находится на более высоком уровне, возможно его непрерывное продолжение вверх;
- от точки над распылителем все соответствующие питающие линии должны находиться под наклоном в обратном направлении так, чтобы проходил дренаж каналов CHS, которые открываются по завершении мойки CIP;
- все коллекторы CIPR (возврата) должны находиться под постоянным наклоном по отношению к насосам и, как правило, подъемы от насосов становятся наивысшими точками системы. Трубопроводы рециркуляции (CIPR) будут находиться под постоянным наклоном от этой точки по отношению к станции CIP;
- первичные и вторичные магистрали подачи системы CIP в своем большинстве имеют диаметр в 2 дюйма, рассчитанный на расход от 40 до 80 гал/мин.

### 15.3.1.4 Определение размеров насосов и управляющих клапанов системы CIP

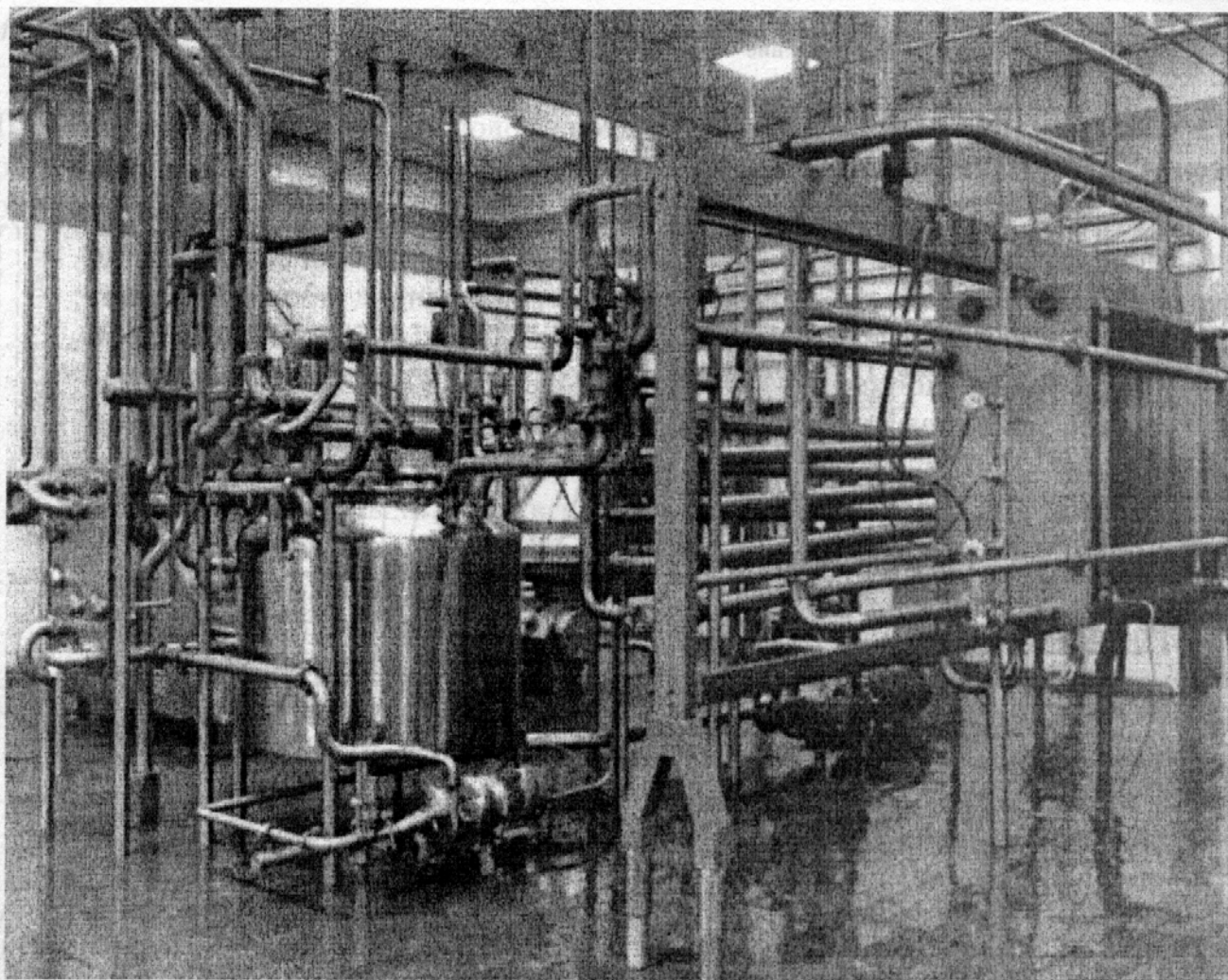
Регулятор потока (FCV) должен представлять собой дросселирующий распределитель с CV, на долю которого приходится от 20 до 25% потери напора всей системы CIP. Результатом этого является хорошая восприимчивость, быстрая реакция на регулировку расхода и предотвращение «дросселирования» за счет срабатывания на слишком незначительном расстоянии от седла клапана. Использование в системе CIPS измерительных приборов вихревого потока и регуляторов потока позволяет осуществлять программное управление всем потоком CIP и, кроме того, это является заметным усовершенствованием по сравнению с ограничителями, применявшимися для балансировки потока с того момента, когда была внедрена мойка CIP и вплоть до середины 1970-х гг.

### 15.3.1.5 Мойка CIP как неотъемлемая часть технологического процесса

Для осуществления высокоэффективной мойки CIP не всегда требуется закупать и монтировать агрегаты CIP и соответствующие подводящие и возвратные трубопроводы. На рис. 15.19 представлена схема используемого в молочной промышленности высокотемпературного быстродействующего пастеризатора (HTST), представляющего собой сочетание трехсекционного пластинчатого теплообменника, резервуара с постоянным уровнем, удерживающей трубы, клапана отвода потока и соединительного трубопровода (он может быть спроектирован с учетом конкретных производственных условий и должен быть способен обеспечить высокоэффективную мойку под автоматическим управлением). Такая система фи-







**Рис. 15.20.** Такая система *HTST* оборудована резервуаром *CIP* постоянного уровня, подача в который осуществляется посредством панели с перекидными калачами

### 15.3.2 Мойка *CIP* технологического оборудования для производства сухих продуктов

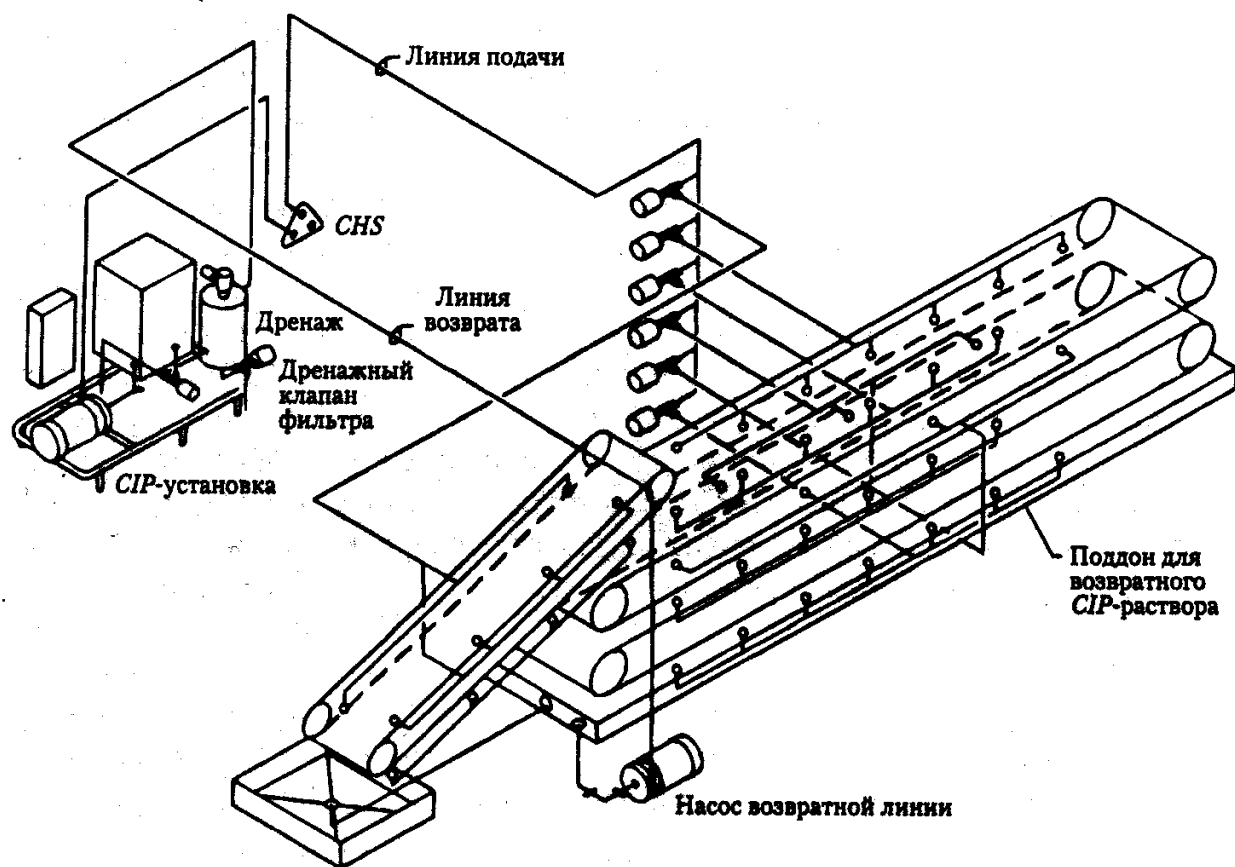
Примерно до 1963 г. распылительная сушилка для получения сухого молока считалась надежной с точки зрения ее санитарной обработки, поскольку она была постоянно сухой и горячей, а значит, не поддерживала рост микроорганизмов. Несколько вспышек пищевых отравлений стали толчком к разработке систем *CIP*, которые были в состоянии обеспечить более эффективную мойку сушилок, чем применявшиеся на тот момент процедуры мойки оборудования вручную. Поскольку наибольшему загрязнению подвергалась основная камера, довольно часто принималось решение об установке оборудования мойки *CIP* исключительно для этой части системы. Тем не менее опыт достаточно быстро показал, что затраты труда на отделение основной камеры от системы труб, циклонов, вентиляционных труб и т. п., весьма велики и отнимают много времени. Кроме того, перемещение влаги на этих участках в процессе мойки приводит к частичному увлажнению сухих остатков, последующему комкованию, а впоследствии и к попаданию этого материала ненадлежащего качества в конечный продукт. В течение нескольких лет было установлено, что наиболее эф-

фективным методом мойки распылительной сушилки является мойка всей системы, а значит, существует необходимость в конструировании соответствующей системы.

Основные концепции и критерии, а также стандарты 3-А, применяемые в системе мойки *CIP* распылительной сушилки, на протяжении двух последних десятилетий были использованы при конструировании и монтаже самых разных компонентов оборудования, а также технологических линий. Проявлявшиеся здесь проблемы были сравнимы с теми, которые возникали в процессе одновременной мойки одной или нескольких распылительных сушилок, установленных в отдельной системе. Без дополнительных проверок стандарты 3-А допускают при мойке *CIP* применение исключительно сварных трубопроводов и резервуаров силосного типа. Тем не менее следование основным принципам стандартов 3-А позволило сконструировать множество удовлетворительных систем *CIP* для технологических процессов изготовления продуктов быстрого питания, сухих хлопьев и лекарств, а также для производства используемых в сельском хозяйстве химикатов. Обязательным для каждого из вариантов явилось сокращение до минимума отверстий (лючков) для осуществления проверок и мойки вручную, поскольку *возможность контроля и мойка CIP взаимно несовместимы*. Эти проекты потребовали гораздо более высокого уровня конфиденциальности, чем обычные осуществляемые в молочной промышленности проекты, и опыт последних 20 лет был описан в работе [20] лишь недавно, а именно в 1996 г. Некоторые общие моменты конструирования типового технологического оборудования мы приводим ниже.

На рис. 15.21 приведен вариант применения стационарно установленных распылителей, предусмотренных для мойки конвейерной ленты из нержавеющей стали в машине непрерывного действия для производства сыров типа «чеддер». Весь конвейер, состоящий из лент, роликов и распылителей, смонтирован внутри корпуса из нержавеющей стали с такими же съемными кожухами, разработанными и установленными специально для принуждения раствора к сливу на рециркуляционный сгонный резервуар (поддон) *CIPR* на дне машины (шириной примерно 3 фута и длиной 60 футов). Показанный на этом рисунке агрегат *CIP* включает в себя приводной поворотный сетчатый фильтр в рециркуляционной линии *CIP*, назначение которого состоит в удалении из возвратной магистрали не растворившихся комков сыра и предотвращении их попадания в систему *CIP*, результатом чего может стать забивка форсунок.

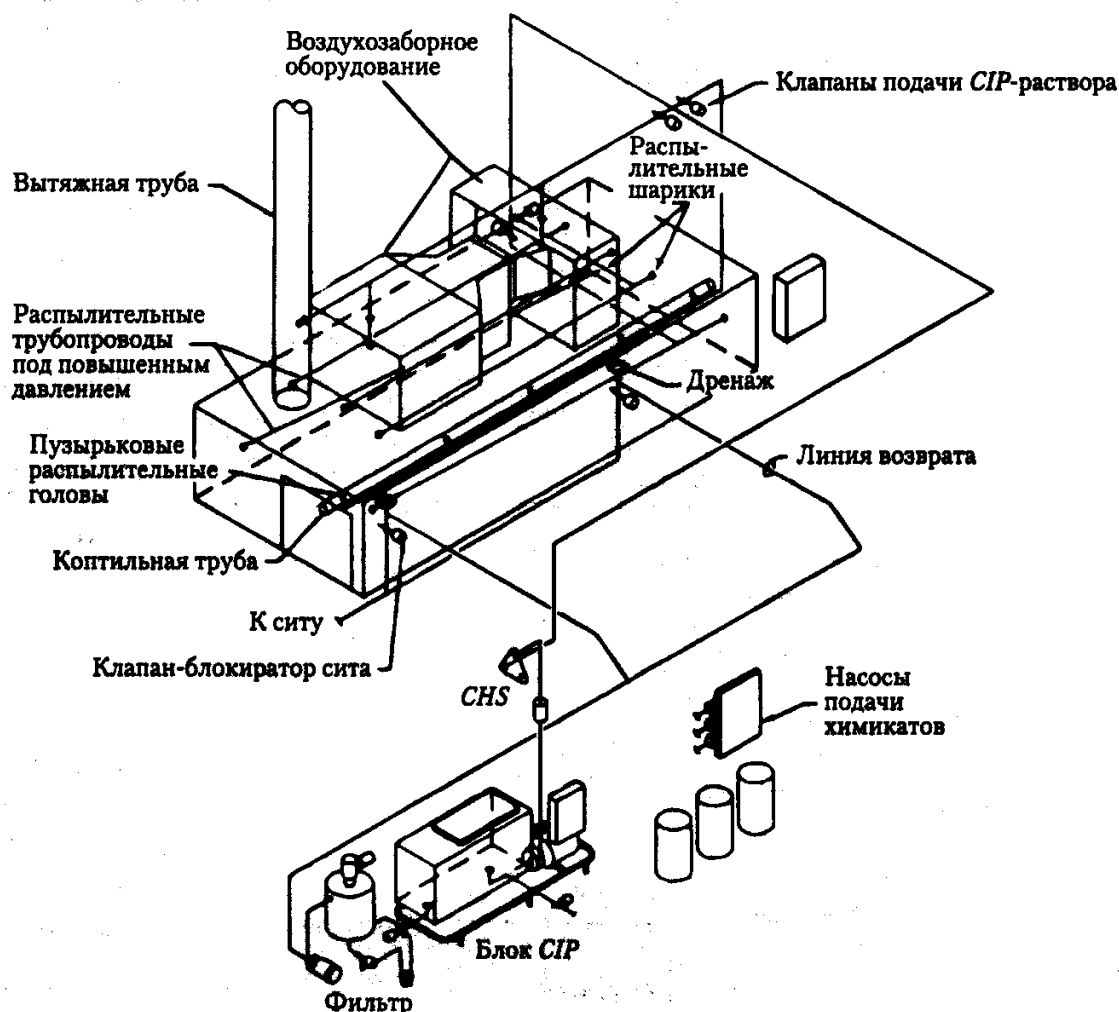
Несколько лет назад коптильни для мясных продуктов изготавливались из малоуглеродистой (мягкой) стали, поскольку они были постоянно горячими и сухими, а наличие естественного жира предотвращало их ржавление. Чистка коптильных камер осуществлялась лишь время от времени посредством их выскабливания. Впоследствии загрязнение продукта остаточным материалом стало вызывать большее беспокойство, а коптильни начали изготавливать из нержавеющей стали, хотя их конструкция осталась прежней. Пульверизационная мойка под высоким давлением и пенная мойка оказались очень трудоемкими и по большей части не давали 100%-ного эффекта. После внесения первых предложений о возможности осуществления мойки *CIP* коптильной камеры удалось быстро установить, что коптильня сходна с сушилкой молока и сыворотки. Сходство этого оборудования состоит в наличии больших камер, систем трубопроводов, вентиляционных труб и оборудования для



**Рис. 15.21.** Агрегат непрерывного действия по производству сыров типа «чеддер» оснащен перфорированными лентами из нержавеющей стали, размещающимися на опорных роликах и направляющих, расположенными в корпусе из нержавеющей стали, габариты которого составляют примерно 40 × 4 × 8 футов. Он может служить примером того, как шариковые и пузырьковые форсунки могут быть использованы для подачи промывочного, моющего и ополаскивающего растворов в последовательности нанесения сверху вниз. Нерастворимые вещества следует удалять из рециркуляционного раствора посредством приводного поворотного сетчатого фильтра

кондиционирования и распределения воздуха. Проявляющиеся на этих поверхностях загрязнения содержат креозот, обуглившийся белок и жир, которые представляют собой наиболее стойкие загрязняющие вещества, когда-либо подвергавшиеся удалению за счет использования системы CIP. Оказалось, что высокообъемная рециркуляция хелатной каустической соды примерно 3%-ной концентрации при 175–180 °F способна удалить все загрязнения со всех поверхностей системы. При использовании низкообъемных систем высокого давления или систем пенной мойки для достижения даже более низких результатов требовалось 18 человеко-часов. Принципиальная схема типовой коптильной камеры приведена на рис. 15.22.

Поскольку в загрязнениях, характерных для коптильных камер, высок уровень содержания нерастворимых частиц, на системе CIP, используемой на этом оборудовании, также использовался приводной поворотный сетчатый фильтр.



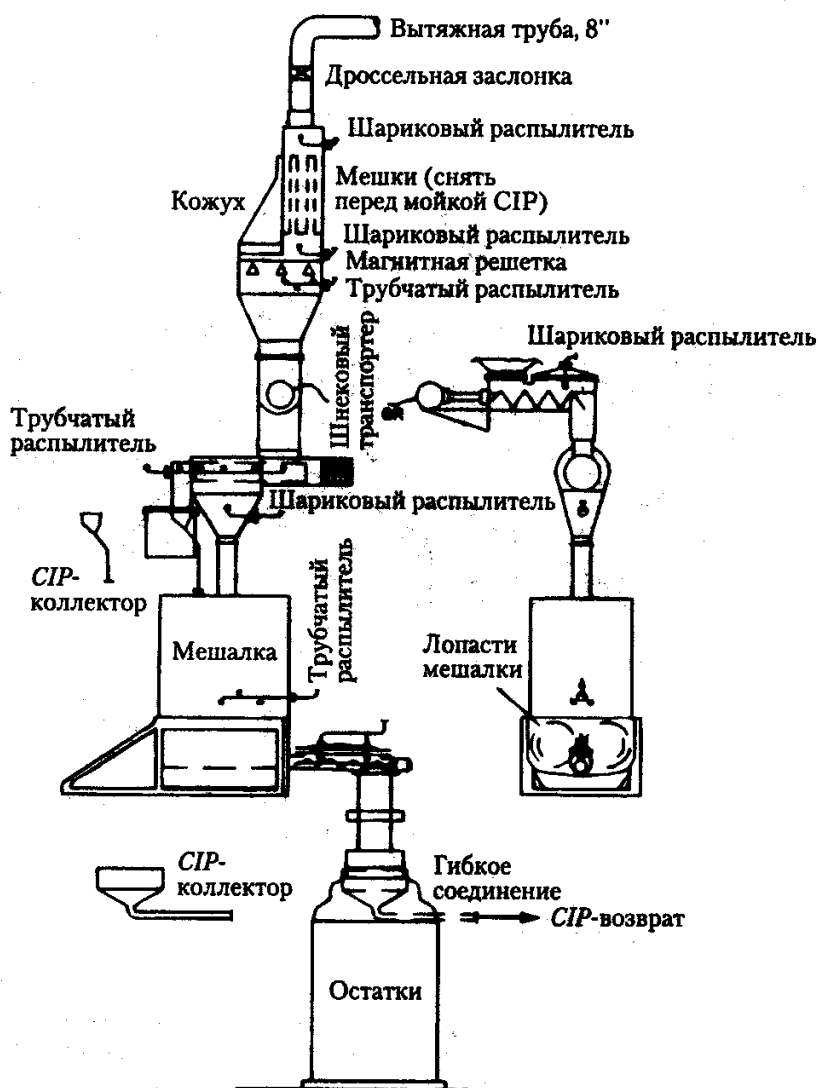
**Рис. 15.22.** Коптильня из нержавеющей стали размером примерно 30 × 8 × 10 футов плюс рециркуляционное оборудование, оборудование для нагрева воздуха и генераторы дыма являются примером того, как применение стационарных трубчатых и шариковых форсунок может обеспечить мойку больших поверхностей труднодоступных участков

### 15.3.2.1 Использование систем CIP в производстве сухих гранулированных продуктов

Понятие «производство сухих гранулированных продуктов» относится к любой системе, которая 1) перерабатывает твердые продукты и 2) не содержит (удерживает) воду благодаря:

- использованию соответствующего оборудования;
- согласованию машин между собой, включающему передачу пищевых продуктов между закрепленными, вибрирующими, вращающимися или иным способом перемещающимися частями.

Проще говоря, очень легко подвергнуть мойке CIP систему трубопроводов за счет рециркуляции давления или посредством форсунок вымыть резервуар с единственным выпускным отверстием для рециркуляции потока раствора. Гораздо более сложную задачу в этом отношении представляет собой оборудование, используемое для сушки молока или сыворотки, сыров, копчения мясных продуктов, изготовления продуктов быстрого питания и разнообразных блюд из круп. Тем не менее принципы конструирования и основной подход к решению этой задачи очень схожи.



**Рис. 15.23.** Устройство для выгрузки, измельчения, просеивания и смешивания, изображенное на этом рисунке, оборудовано стационарными форсунками шарикового, пузырькового и трубчатого типов (см. рис. 15.8. и 15.9). Обратите внимание на два CIP-коллектора и изображенные пунктиром монтажные участки

### 15.3.2.2 Пример использования CIP в производстве сухих гранулированных продуктов

Система выгрузки, измельчения комков, просеивания и смешивания порошка, изображенная на рис. 15.23, применяется во многих технологических процессах производства сухих продуктов, причем иногда устанавливается несколько таких систем, что позволяет обрабатывать одновременно несколько ингредиентов.

В системе управления процессом измельчения комков и контроля пылеобразования, изображенной в верхней части рисунка, до начала процесса CIP необходим доступ для удаления мешков, а также установка уплотненной крышки (кожуха) для герметизации накопителя. Линия вывода с дроссельным клапаном закрепляется ниже калача. Одиночная шариковая форсунка на калаче, расположенном выше участка с мешками, обеспечивает нанесение жидкости на участок, расположенный ниже меш-



кодержателей, а также ее попадание на наружную поверхность клапана. В более совершенном варианте конструкции этот клапан размещается в горизонтальной ветви трубопровода над калачом; кроме этого, на самом колене монтируется еще одна форсунка для мойки наружной поверхности клапана.

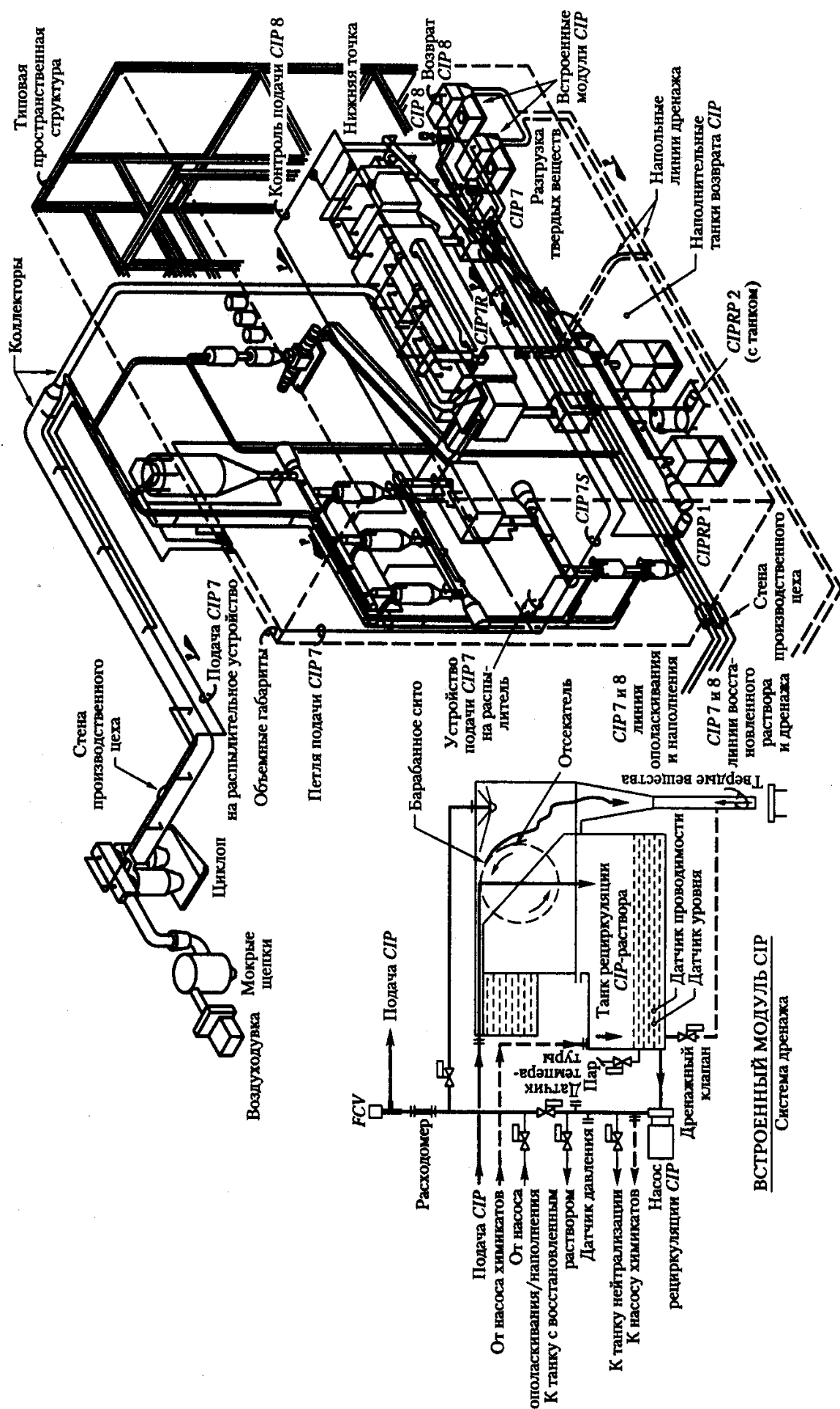
Такая конструкция помогает избежать попадания сухого вещества, находящегося под клапаном, обратно в чистую систему уже после того, как клапан будет открыт по завершению мойки *CIP*.

Смонтированная на калаче форсунка над измельчителем обеспечивает попадание растворов на участок ниже мешкодержателей и на верхнюю часть измельчителя. Составная пузырьковая форсунка содействует попаданию раствора на нижнюю часть измельчителя, участок накопителя и желоб к шнековому питателю и сити. Для мойки винтового конвейера устанавливаются шариковые или пузырьковые форсунки. Наиболее эффективная мойка сита достигается за счет монтажа форсунки внутри него, а попадание раствора на корпус обеспечивается форсункой, расположенной под ситом. Для выполнения мойки *CIP* устанавливается соответствующий съемный коллектор, который служит для отвода раствора (сливаемого через расположенный в конце сита желоб, предусмотренный для отвода крупных частиц в расположенную далее мешалку).

Мешалка (миксер) оснащена лопастями, которые на рис. 15.23 изображены только с торца, и разгрузочным шнеком посередине. Многопузырковая трубчатая форсунка обеспечивает достаточное попадание раствора на корпус мешалки, вращающиеся лопасти и шнек. Как видно из рисунка, в сливной трубе шнекового питателя необходимо установить дополнительные пузырьковые форсунки. Большой поддон *CIP*-коллектора устанавливается вручную, он предусмотрен для приема всего рециркуляционного потока. Раствор на форсунки различных участков подается от отдельных распределительных клапанов *CIPS*, от которых промывочный, моющий и ополаскивающий растворы поступают на опрокидыватель, сито и мешалку, а затем распределяются по всему оборудованию в течение всего времени выполнения программы *CIP*. Правильный выбор и применение форсунок позволяет осуществить мойку всей системы с максимальным расходом от 80 до 100 галлонов/мин.

### 15.3.2.3 Применение *CIP* в производстве сухих крупяных продуктов

Конструкция крупной технологической линии по переработке сухих продуктов из злаковых культур рассчитана на применение *CIP* благодаря монтажу всего оборудования на трех опорах, подобно тому, как это изображено на рис. 15.24. Технологический процесс не является «водонепроницаемым», поскольку большое количество передач продукта от одной установки к другой происходит между вибрирующими или вращающимися частями, которые не удастся герметизировать относительно друг друга. Таким образом, технологический процесс является пылеобразующим, и по окончании производственного цикла (5–12 дней) мелкая пыль и превратившиеся в нее частицы продукта оседают на опорах и внешних поверхностях оборудования. Существенным изменением является решение о внесении в конструкцию внешней системы *CIP*, которая служила бы средством для удаления как скопившихся твердых отходов, так и промывочных, моющих и ополаскивающих раство-



**Рис. 15.24.** Маршрут питающего трубопровода CIP к форсункам в агрегатах, необходимых для производства сухих гранулированных продуктов, а также его маршрут к системе трубопроводов сбора измельченного продукта. Технологическая установка монтируется на нескольких пространственных опорах, расположенных на плиточном полу предприятия. Оборудование промывается отдельными станциями CIP одновременно с наружной и внутренней сторон. Основное оборудование, необходимое для поддержания процесса CIP, изображено на рис. 15.30



ров, которые вытекают из системы *CIP* в ходе выполнения моющих программ, каждая из которых разработана для мойки той или иной установки одновременно внутри и снаружи.

Для управления рециркуляцией раствора с помощью внешней станции *CIP* пространственные опоры располагаются выше плиточного пола цеха и закрепляются в стойком к химическому воздействию цементном растворе. Тем самым они служат рециркуляционным коллектором системы *CIP*. По ПВХ-трубам большого диаметра жидкость передается от пола к четырем внешним станциям *CIP*, каждая из которых оборудована неподвижными сетчатыми фильтрами для задержки любых твердых веществ, способных заблокировать форсунки в процессе рециркуляции. Эти твердые вещества передаются в отстойник для последующего их вывоза.

Технологический процесс подразумевает использование печей, специально разработанных с учетом возможности их отдельной мойки при помощи форсунок (аналогично молочным резервуарам) и обычных трубопроводов подачи и возврата. На питающих и возвратных трубопроводах этих компонентов имеются автоматизированные стонные резервуары для возвратных стоков (поддоны), заменяющие аналогичные, изображенные на рис. 15.23.

Кроме того, эта технология подразумевает использование нескольких горизонтальных резервуаров, предназначенных для жидких ингредиентов. Эти резервуары также моют с помощью стандартных систем питающих и возвратных трубопроводов *CIP*, позволяющих промывать любой резервуар или связанные с ним приемные и передающие магистрали в тот момент, когда они не используются. Методы промывки схожи с рассмотренными на рис. 15.17.

Остальные установки, участвующие в технологическом процессе, промываются одновременно от *встроенных элементов CIP*, размещенных на нижней точке каждой установки (но выше пола, см. рис. 15.24) Они поддерживаются большими резервуарами, мощными насосами *CIP*, необходимыми распределительными клапанами подводящих и возвратных трубопроводов, а также внешними станциями *CIP*, размещенными на самом нижнем уровне данного помещения (рис. 15.30).

Каждый из контуров *CIP* сконструирован таким образом, чтобы он мог быть промыт примерно 300 галлонами рециркуляционного раствора. Этот объем воды состоит из:

- воды, необходимой для заполнения питающего трубопровода системы *CIP* (от *CSP* к форсункам);
- воды, стекающей в настоящий момент по поверхностям, подвергающимся струйной мойке при расходе 300 галлонов в минуту в любой момент времени;
- воды, которая, стекая с компонентов оборудования, подвергшихся струйной мойке ранее, собирается в лужи (разумеется, с небольшой задержкой);
- объема воды, необходимой для подачи на *CSP*, в накопителе сетчатого фильтра и резервуаре станции *CIP*.

На детальной схеме встроенного элемента *CIP* (рис. 15.30, слева) показаны маршруты прохождения раствора на этапе рециркуляционной мойки (этот этап входит в программу *CIP*), что облегчит понимание работы системы, описание которой приводится ниже.

1. *Предварительное ополаскивание.* Восстановленный раствор (в случае его наличия) или вода из резервуаров, проходя через насосы ополаскивания/подачи (рис. 15.30) и расходомер, поступает на FCV, а затем на форсунки по контуру подачи CIPS, то есть по одному из контуров CIPS7 или CIPS8, изображенных на рис. 15.24. От них отдельные распределительные клапаны управляют потоком, направляющимся к различным группам форсунок. Подобная петля предотвращает возникновение каких-либо тупиковых ответвлений на стороне подачи системы.

Ополаскивающие растворы последовательно разбрызгиваются внутри различных участков контуров, расположены выше встроенного элемента CIP, и под действием силы тяжести стекают в сборный резервуар поворотного сетчатого фильтра, закрепленного над рециркуляционным резервуаром CIP. Те участки контуров, которые обрываются ниже встроенных элементов CIP, оборудованы соответствующими рециркуляционными насосами (то есть для циклонов, виброконвейеров и промежуточных (уравнительных) бункеров на рисунке слева CIPR1 и CIPR2 со сборным резервуаром для приемки стоков и с наполнителем рециркуляционных резервуаров CIP, расположенных ниже кожухов станции CIP). Слив с этих рециркуляционных насосов осуществляется на поворотный сетчатый фильтр встроенного элемента CIP.

Твердые частицы в рециркуляционном потоке удаляются при помощи ракельного ножа и через желоб попадают в возвратный трубопровод внешней станции CIP. Форсунка внутри корпуса сетчатого фильтра непрерывно промывает участок сливного канала для разжижения твердых частиц и перемещения их в возвратный трубопровод.

После завершения предварительного ополаскивания дренажный клапан резервуара открывают для заполнения его водой и окончательного ополаскивания.

2. *Собственно мойка.* Сначала производится заполнение системы, то есть доставка необходимого количества воды через форсунки и возвратные трубопроводы в рециркуляционный резервуар CIP в объеме, определяемом программным образом. В момент достижения нужного объема работа ополаскивающего/заполняющего насоса прекращается, и станция CIP начинает рециркуляцию моющего раствора по контуру и обратно через сетчатый фильтр. Для впрыскивания пара и последующего нагрева раствора открывается паровой клапан, а подающие химические соединения насосы посылают щелочной раствор в соответствующий контур (см. рис. 15.4). Отсчет времени мойки начинается с того момента, когда жидкость во всем контуре достигнет необходимой температуры, и продолжается до тех пор, пока необходимое количество раствора не пройдет по отдельным участкам достаточное количество раз. Продолжительность мойки для различных участков может быть отрегулирована независимо от степени загрязненности каждого из участков.

3. *Ополаскивание.* Водопроводная вода подается из резервуара через насосы ополаскивания/заполнения и расходомер и поступает на FCV, а затем на форсунки аналогично этапу предварительного ополаскивания. Возвратный поток CIPR проходит через поворотный сетчатый фильтр и поступает в рециркуляционный резервуар CIP, а затем через CSP — в резервуар для восстановленного раствора (в целях использования в качестве раствора для предварительного ополаскивания следующего участка). Если резервуар восстановленного раствора заполняется до высокого уровня, слив отводится в резервуар для нейтрализации. После завершения ополаскивания откры-

вается дренажный клапан для осушения этого резервуара и наполнения его водой для окончательного ополаскивания.

**4. Подкисленное окончательное ополаскивание.** Сначала система заполняется (см. этапа собственно мойки). Когда начинается рециркуляция от станции *CIP* через промываемые участки и обратно (через поворотный сетчатый фильтр), паровой клапан вновь открывается и вводится пар для нагрева раствора, а насосы подачи химикатов прокачивают кислый раствор через контур подачи химикатов (см. рис. 15.3). Отсчет времени ополаскивания подкисленным раствором начинается в тот момент, когда на всех участках будет достигнута необходимая температура, и заканчивается, когда необходимое количество раствора пройдет по различным участкам достаточное количество раз. После окончания окончательного ополаскивания а) подводящий *CIP*-трубопровод будет очищен от ополаскивающего раствора путем его продувки до всех форсунок воздухом и б) дренажный клапан откроется для осушения резервуара, использовавшегося для окончательного ополаскивания.

**5. Осушение и сушка оборудования.** Программа завершается после подачи на все поверхности горячей, слегка подкисленной воды, которая быстро сливается и высыхает. После завершения всех программ включаются вентиляторы сбора пыли, которые перемещают воздух с контролируемой температурой и влажностью по всему оборудованию, устраняя таким образом последние следы влаги.

**6. Параллельная внешняя мойка *CIP*.** В ходе описанного выше процесса по всем внешним поверхностям оборудования и трубопроводов осуществляется постоянная рециркуляция свежей воды. Всякий раз, когда по причине утечки концентрированных моющих растворов из внутренних участков концентрация химических веществ достигает минимального заданного значения, подаваемый на внешние поверхности раствор сливается в резервуар нейтрализации и освежается за счет добавления в него водопроводной воды.

Применение описанной выше концепции *CIP* внутренних и внешних поверхностей оборудования требует, чтобы все технологическое оборудование и соединительные конвейеры (транспортёры), желоба и трубопроводы были сконструированы таким образом, чтобы они:

- соответствовали определенными ранее критериями использования мойки *CIP*;
- максимально сохраняли моющий раствор на всех перепускных точках;
- обеспечивали поступление всех моющих растворов на смешивание следующим образом: сначала используемые для мойки внутренних поверхностей, затем — для мойки внешних поверхностей;
- гарантировали безнапорный возвратный поток и слив с технологического оборудования на расположенные ниже агрегаты *CIP* в один или несколько возвратных *CIP*-коллекторов, также находящиеся на низшем уровне (с последующей подачей на один уровень выше насосом).

Все оборудование и его основные элементы (перечисленные ниже), необходимые для ведения производства и управления им, должны быть спроектированы с учетом возможности их безразборной мойки *CIP*.

**Транспортеры ленточного типа.** Ленты устанавливают в желобах из нержавеющей стали, сконструированных подобно небольшому прямоугольному резервуару и

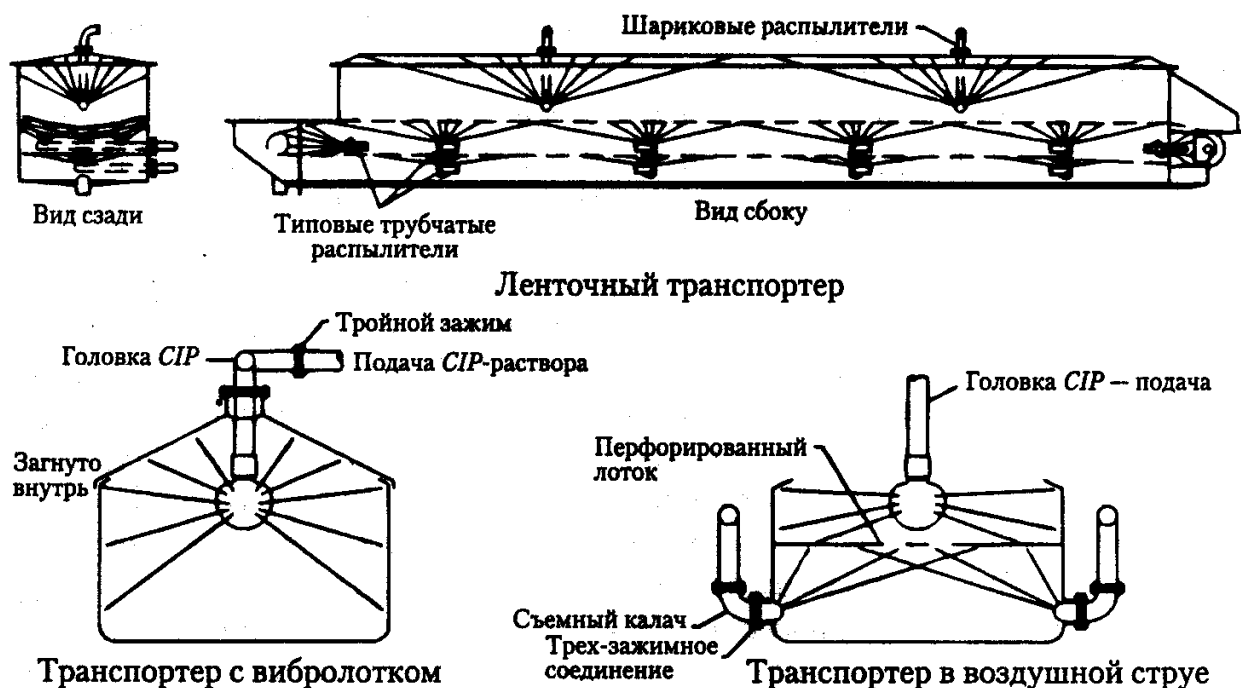


Рис. 15.25. Ленточные транспортеры, транспортеры с вибрационным лотком и поточные конвейеры могут быть сконструированы так, чтобы они соответствовали принципам мойки CIP

оборудуют подвижными опорами на шарнирах, проходящими через отверстия в боковых стенках на внешние подшипники (рис. 15.25). Конструкция корпуса соответствует гигиеническим критериям относительно уплотнений, радиуса закруглений, дренажного уклона, возможности доступа для осуществления проверки и технического обслуживания и т. д. Все внутренние поверхности обрызгиваются многочисленными стационарными форсунками, что представляет собой один из этапов многоступенчатой программы, осуществляющейся на участках питающих и сливных трубопроводов и затрагивающей связанное с ними оборудование. Типовые ленточные транспортеры (конвейеры) требуют в ходе мойки CIP подачи моющих растворов от 80 до 120 гал/мин (с перерывами в течение работы программы).

**Транспортеры с вибрационным лотком.** Поперечное сечение транспортера такого типа также приведено на рис. 15.25. В нескольких дюймах выше лотка транспортера рекомендуется смонтировать стационарную крышку (кожух). Верхний край боковых стенок транспортера должен быть слегка загнут внутрь, что способствует удержанию моющего раствора внутри лотка. Внутри неподвижного кожуха на расстоянии с интервалом приблизительно 12 футов форсунки могут быть смонтированы шариковые распылители с осевым перемещением. Монтаж распылителей начинается на расстоянии 6 футов от одной из сторон, а подача на них осуществляется с общего коллектора, покрывая каждый участок кожуха. Наклон такого конвейера со стороны подачи к стороне слива должен составлять от 1/16 до 1/8 дюймов/фут, что позволяет производить основной слив моющего раствора через вертикальный канал к последующему оборудованию.

**Транспортеры с псевдоожиженным слоем.** Поперечное сечение таких транспортеров также приведено на рис. 15.25. Боковины транспортеров подобного типа должны быть достаточно высокими, чтобы обеспечить расположение распыляющего уст-

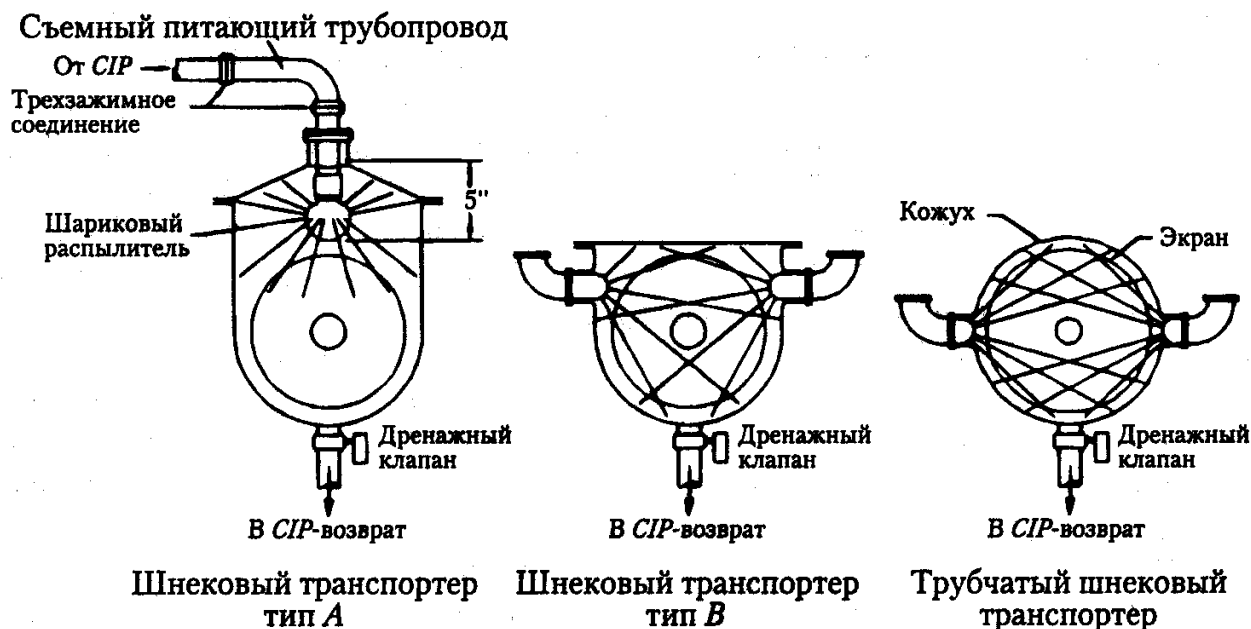


Рис. 15.26. Монтаж распылителей на шнековых транспортерах, бланшировщиках и другом подобном оборудовании должен осуществляться с учетом необходимых зазоров

ройства на уровне ниже верхнего края, но выше воздушного потока. Форсунки монтируют на расстоянии примерно 12 футов от центра; раствор поступает к ним от расположенного выше (на полтора дюйма) коллектора. В зависимости от технических условий заказчика отверстия в распылителях просверливают таким образом, чтобы был обеспечен необходимый горизонтальный рисунок распыления, причем вода, отражаясь от боковых стен, сливается на перфорированный поддон. Если необходимо осуществлять промывку участков приточной вентиляции, то для этого достаточно использовать пузырьковые распылители, проходящие сквозь боковые стенки и расположенные на противоположных сторонах с интервалами в 8 футов. Для обеспечения необходимого для проверки и/или мойки доступа требуется наличие между этим коллектором и распылителями полуторадюймового питающего коллектора на каждой из сторон и тройных перекидных калачей. Возможна также установка распылителей пузырькового типа таким образом, чтобы они проходили сквозь дно участка приточной вентиляции, что позволит снизить затраты приблизительно в половину.

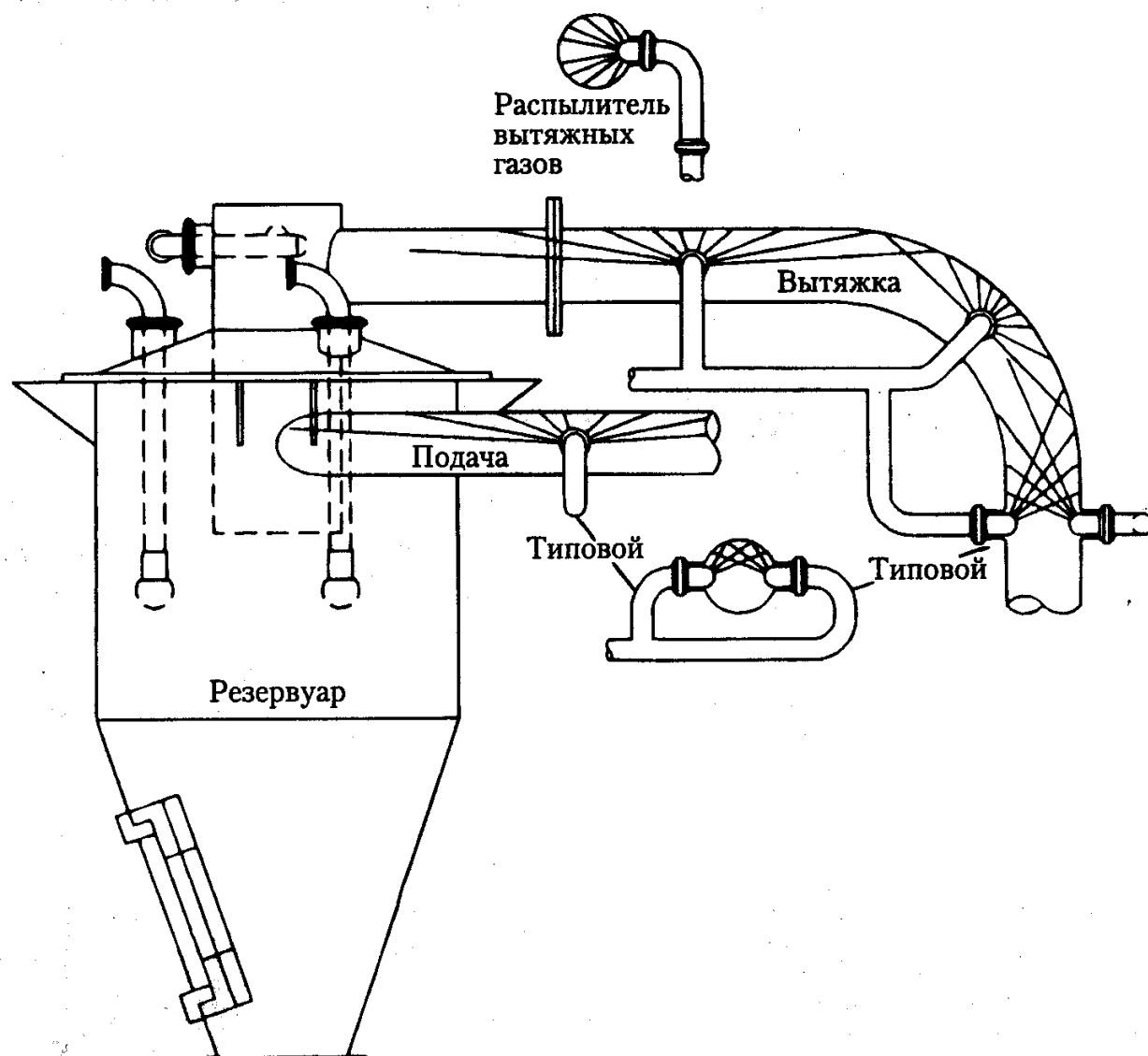
**Шнековые транспортеры.** В зависимости от размера и типа этих транспортеров их струйная мойка может осуществляться либо за счет стационарных распылителей, расположенных на боковых стенках и/или кожухах, либо за счет мойки под давлением в ходе прохождения рециркуляционного потока. На рис. 15.26 приведен вариант использования шариковых распылителей для обработки комбинации лотка/шнека (или лопасти) с поднятым кожухом (тип А). Кожух должен обеспечивать минимальный зазор в 5 дюймов между верхней частью шнека и верхней поверхностью кожуха. Сквозь кожух прорезается отверстие, в которое приваривается трехдюймовая форсунка для приема питающей трубы шарикового распылителя. Для облегчения демонтажа кожуха необходимо наличие съемного питающего соединения с тройными перекидными калачами между питающей трубой распылителя и питающим коллектором CIP.

Если разгрузка продукта со шнекового транспортера осуществляется с уровня выше днища, необходимо предусмотреть вспомогательное дренажное соединение с клапаном и системой подачи моющего раствора *CIPR*. Единственный распылитель шарикового типа, смонтированный в соответствии с рис. 15.26, может обрабатывать шнековый транспортер общей длиной от 4 до 6 футов. Отражение жидкости от верхней части и торцов обеспечит возможность охвата концов шнека, работающего в процессе мойки, что обеспечивает таким образом охват всех поверхностей. Если на шнековом транспортере необходимо наличие плотного и плоского кожуха, это делает невозможным использование распылителей шарикового типа и связанного с ними отражения раствора от боковых стенок. Как показано на рис. 15.26 (тип *B*), установка такой конфигурации может быть промыта за счет монтажа распылителей пузырькового типа, проходящих сквозь боковые стенки в нескольких дюймах ниже кожуха и расположенных попеременно на каждой стороне лотка. Как и в случае с упоминавшимся выше типом шнекового транспортера, на протяжении всей программы *CIP* шнек должен вращаться.

Шнековые транспортеры большого диаметра, расположенные в трубе диаметром 12–16 дюймов, также могут быть оборудованы распылителями пузырькового типа, и если зазор между трубой и шнеком минимальный, то распылитель может быть утоплен, как показано на рис. 15.26. Исходящие из накопителей шнековые питатели небольшого диаметра проще всего промывать под давлением в рециркуляционном потоке через соответствующее сочленение *CIPR*. Для управления потоком и поддержания его скорости в диапазоне от 1 до 2 футов/с (в зависимости от диаметра трубы) в конструкцию питающей магистрали *CIP* может быть включен ограничитель. Для питающего накопителя также предусмотрен распылитель. В боковой стенке накопителя чуть выше шнека для слива всего потока необходимо предусмотреть соединение с трубопроводом рециркуляционного потока *CIP*.

**Накопительные бункеры/циклонные сепараторы.** На рис. 15.27 изображена схема резервуара, который может выступать в качестве накопительного бункера для пневматической транспортировочной системы или циклонного сепаратора. В большинстве случаев эффективная мойка подобного накопителя или сепаратора осуществляется за счет установки трех распылителей шарикового типа с захватом каждого 120°, конструкция которых и расстояние между ними определяется параметрами потока, зависящих от диаметра резервуара или камеры. Система подающих и выпускных каналов вместе с желобами и выпускными отверстиями обычно включается в общий контур. В этом случае отделить одну технологическую установку от другой невозможно. Пузырьковые распылители используются в этом варианте исключительно для того, чтобы свести к минимуму нарушение поперечного сечения трубопровода. Обычный питающий коллектор в виде вертикальной ветви трубопровода, центрированной относительно точек подачи жидкости к распылителям, осуществляет подачу раствора на распылители, промывая в течение одного этапа *CIP* значительную площадь.

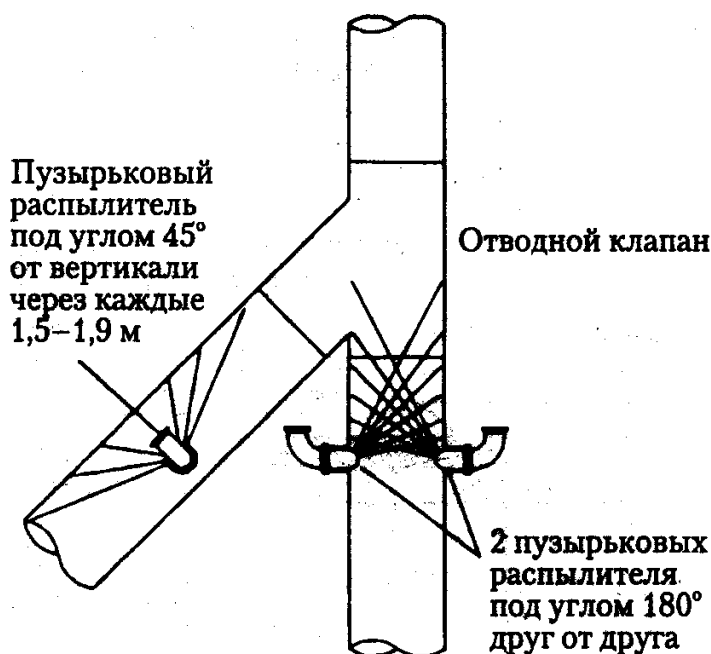
В системе трубопроводов можно предусмотреть перепускные клапаны. На рис. 15.28 изображено типовое размещение распылителей пузырькового типа в вертикальных или наклонных трубопроводах диаметром от 6 до 8 дюймов относительно перепускного клапана. В вертикальном трубопроводе используются два распылителя, расположенные непосредственно под клапаном. Отверстия в этих распылителях делаются таким образом, чтобы разбрызгивание было направлено вверх относительно механиз-



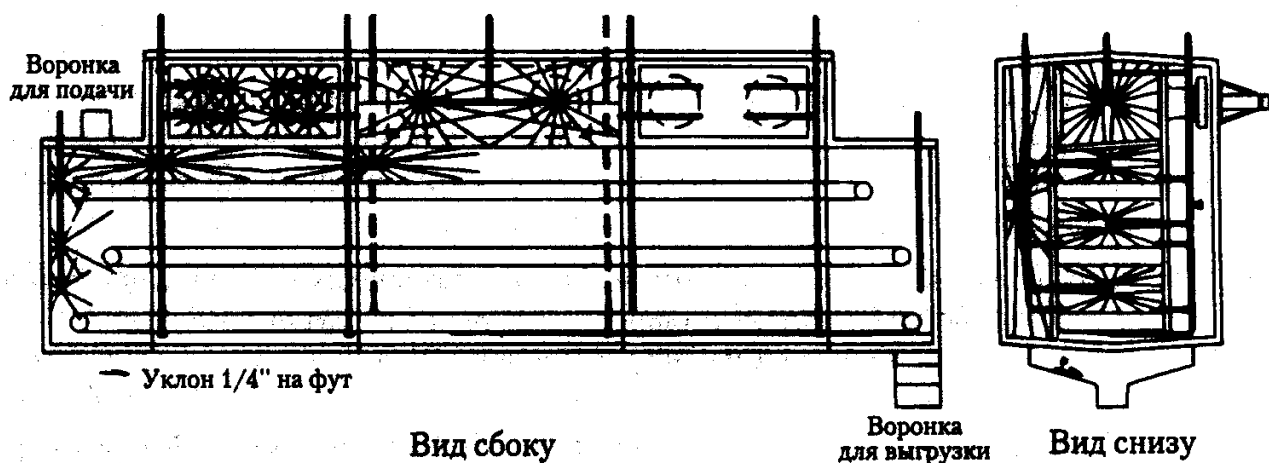
**Рис. 15.27.** Накопительные бункеры, циклоны и связывающие их трубопроводы легко промываются благодаря установке нескольких распылителей шарикового или пузырькового типа

ма клапана. Последующее стекание обеспечивает обработку не менее 20 футов расположенного ниже вертикального трубопровода. На наклонном участке канала и на любых его горизонтальных участках требуется размещать распылители на расстоянии от 5 до 6 футов друг от друга и под углом в  $45^\circ$  к вертикали. Такая концепция применима, например, для оборудования по сбору измельченного продукта, изображенного на рисунке 15.24.

**Сушилки и печи.** Примером подобного оборудования может служить сушилка с несколькими ленточными транспортерами, проекция которой приведена на рис. 15.29. На практике существуют различные разновидности базовой концепции такой установки. По существу, все ленты, опорные и приводные ролики, вентиляторы и нагревательные спирали устанавливаются в больших резервуарах из нержавеющей стали с двумя входными дверцами, предназначенными для технического обслуживания и расположенными с торцов. Печи, где используются высокотемпературные внешние нагреватели, обслуживаются несколько иначе, но по аналогичному принципу.



**Рис. 15.28.** Система вертикальных трубопроводов легко промывается за счет разбрызгивания раствора только в верхней части, однако для промывки наклонных трубопроводов необходимо разместить распылители на расстоянии, определяемом диаметром трубы и конусом охвата



**Рис. 15.29.** Ленточные транспортеры в сушилках следует конструировать так, чтобы минимизировать уплотнения дверец. Предпочтительно размещать ленточные транспортеры, приводы, опорные штанги, катушки и вентиляторы в изолированном прямоугольном резервуаре

**Пневматические транспортеры.** Существуют различные методы мойки под давлением как стандартных, так и транспортировочных систем для плотных продуктов и связанных с ними циклонов. Основной проблемой в процессе CIP является изоляция вентиляторов (воздуходувок).

**Желоба, выпускные отверстия, дивертеры и поворотные клапаны.** Все устройства для передачи продукта и управления потоком конструируются так, чтобы их можно было подвергать мойке CIP.



**Система сбора пылеобразных материалов.** Опыт *CIP* начала 1960-х гг. относительно частичной мойки сушилок молочных производств убедительно доказал, что любая неочищенная поверхность должна быть или полностью изолирована и поддерживаться в сухом состоянии, или же должна быть включена в контуры мойки *CIP* (что лучше с точки зрения простоты, экономичности и оптимальности санитарной обработки и качества продукта). Система, изображенная на рис. 15.24 и 15.30, полностью сконструирована из нержавеющей стали, комплексно оборудована распылителями пузырькового типа и очищается при помощи влагоуловителей. Она используется для сушки после мойки *CIP*, причем программа завершается промывкой.

**Прочее оборудование.** Материалы, использовавшиеся при конструировании дробилок (мельниц), были рассчитаны на мойку посредством химических веществ. Предусмотренные для мойки, промывки и ополаскивания растворы попадают на мельничное оборудование за счет дополнительных распылителей, предназначенных для мойки бесконтактных поверхностей. Экструдеры червячного типа со множеством матриц и подачей, осуществляемой из накопителей, рассчитанных на постоянное пополнение моющих средств, были реконструированы для обеспечения возможности их мойки *CIP*. оборудованы защитными кожухами со стороны разгрузки и включены в контуры *CIP* с учетом всего оборудования, размещаемого на сторонах подачи и слива.

К прочему оборудованию относятся транспортные весы, сита, измельчители (рис. 15.23), отделочные барабаны, магнитные ловушки, опрокидывающие и заполняющие станции, и, в целом, любой компонент технологического оборудования, необходимый для изготовления продукции. Все вышеназванные компоненты объединяют в три модуля изготовления и отделки крупных продуктов.

В дополнение к восьми внутренним узлам *CIP* (смотри внутренний блок *CIP* на рис. 15.24), работающим при потоке со скоростью 300 гал/мин, монтируются также четыре внешних системы *CIP*, работающих со скоростью потока 400 гал/мин за счет распределения теплой водопроводной воды по стационарным внешним распылителям (см. рис. 15.30). Внешние системы *CIP* подают моющий раствор на более чем 1500 распылителей, которые постоянно промывают все поверхности внешнего оборудования в целях удаления пыли и твердых частиц, накапливающихся в процессе производства, а также смывают высококонцентрированные кислотные и щелочные соединения (которые в процессе мойки *CIP* вытекают в точках передачи продукта, из отверстий подшипников и т. д.) с окрашенных, алюминиевых, медных поверхностей и поверхностей, изготовленных из малоуглеродистой стали.

В свою очередь, подача моющих растворов на внутренние и внешние рециркуляционные узлы осуществляется посредством высоконапорных производительных ополаскивающих и нагнетательных насосов, которые забирают воду и восстановленные растворы из резервуаров в 30 000 гал, расположенных на уровне вспомогательного оборудования системы *CIP*. 12 блоков *CIP* могут промыть весь ряд технологического оборудования (все три модуля) примерно за 5,5 ч. За процессом мойки следует сушка, продолжающаяся в течение 2,5 ч в соответствии с графиком производственного цикла. Сушка полностью автоматизирована, требует минимальной мануальной подготовки без присутствия персонала на производственном участке в ходе мойки *CIP*.

Данная технология наиболее применима для новых технологических процессов, где агрегаты еще не укомплектованы и не смонтированы. Для успешного ее внедре-

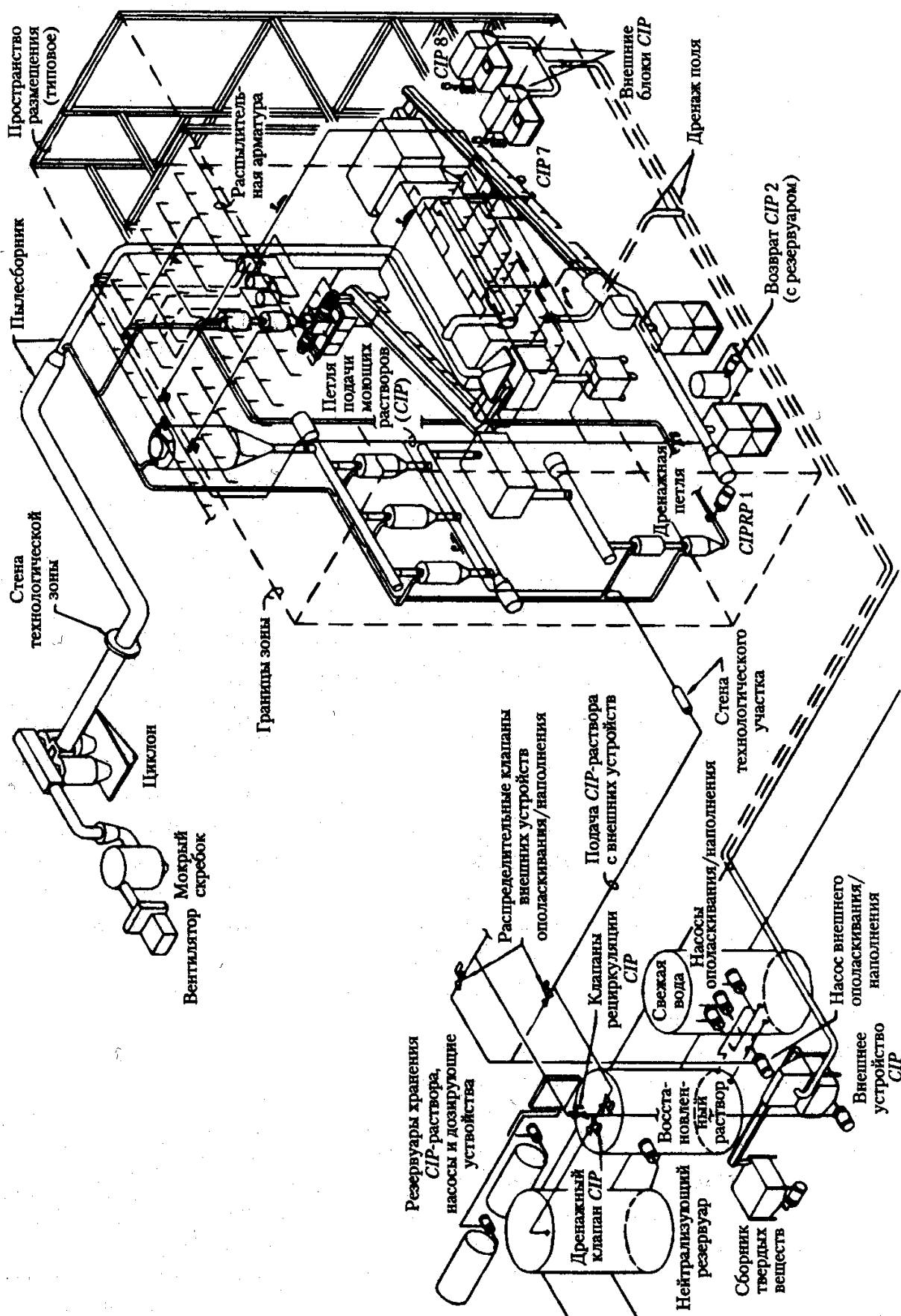


Рис. 15.30. Пространственная схема оборудования, приведенного на рис. 15.24, с маршрутом питающего трубопровода CIP по направлению к внешним распылителям, предназначенным для постоянного смывания моющих химических веществ с негерметичного оборудования и с поверхностей, изготовленных не из нержавеющей стали

ния требуется заблаговременное планирование, причем для полного использования возможностей и обеспечения надежности системы CIP необходимо выполнение всех обязательных условий.

### 15.3.3 Типовые программы и процедуры CIP

#### 15.3.3.1 Общая последовательность обработки

Практически вся безразборная мойка технологического оборудования пищевой промышленности осуществляется растворами на водной основе в ходе программы, состоящей из:

- предварительного ополаскивания водопроводной водой или восстановленным раствором, продолжающегося до тех пор, пока сбросовые стоки не будут достаточно чистыми;
- мойки щелочным раствором с применением множества комбинаций времени и температуры;
- последующего ополаскивания водопроводной водой;
- рециркулированного подкисленного окончательного ополаскивания, осуществляемого, как правило, при температуре окружающей среды и служащего для удаления следов щелочного раствора (которые невозможно просто смыть с поверхностей, изготовленных из нержавеющей стали). Использованию оборудования в последующем технологическом процессе может предшествовать санитарная обработка на базе применения термообработки или химикатов.

Для достижения постоянных и приемлемых результатов мойки в производстве пищевых продуктов необходимо обращать внимание на следующие факторы:

- химический состав воды;
- выбор моющего состава(ов), оптимального для данного процесса;
- определение концентраций, необходимых для наиболее экономичного проведения мойки;
- учет энергетических факторов для усиления эффекта мойки с применением химических веществ;
- определение метода применения того или иного моющего состава.

##### 15.3.3.1.1 Качество воды

При планировании процедур мойки оборудования фактор качества воды невозможно переоценить. Если в воде наблюдается высокое содержание минеральных веществ, образующих накипь (кальция, магния, железа или сульфатов), необходима соответствующая адаптация моющего вещества, которая позволила бы устранить отложения минералов. Другим вариантом рекомендуемых в подобном случае действий является обработка, дающая возможность снизить содержание минералов в воде до ее применения в процессе мойки. Эффективность последующего ополаскивания напрямую связана с качеством используемой воды. Содержащиеся в применяемой для ополаскивания воде магний, кальций, железо и соли магния из щелоч-

ных растворов выпадают быстрее, чем из кислых. Кондиционирование используемой для завершающего споласкивания воды кислотой (до уровня pH 6,5 или менее) помогает контролировать отложение содержащихся в воде солей на вымытых поверхностях оборудования.

#### 15.3.3.1.2 Выбор моющего вещества

Выбор моющего вещества зависит от нескольких взаимосвязанных факторов, включающих:

- тип и количество загрязнений на поверхностях оборудования;
- характер очищаемой поверхности;
- физическую природу моющего вещества;
- используемый метод мойки;
- стоимость;
- затраты на обслуживание.

Существуют примеры контроля количества имеющихся на поверхностях загрязнений за счет более частой мойки оборудования, однако в большинстве случаев моющий раствор должен быть того типа и концентрации, которые позволили бы справляться с наибольшим ожидаемым количеством загрязнений, одновременно обеспечивая некоторые резервные возможности.

В обычных условиях работы пищевых производств изменение в чистоте обработки поверхностей из нержавеющей стали оказывает незначительное воздействие на эффективность их мойки. Необходимо особо учитывать наличие элементов, изготовленных не из нержавеющей стали, например, уплотнений, резиновых или пластмассовых деталей и т. п.

Автоматизированная мойка CIP осуществляется, как правило, посредством жидких химических растворов, работа с которыми, хотя и более опасна, позволяет более четко контролировать их концентрации с помощью устройств подачи жидкостей. Ниже мы рассмотрим этот вопрос лишь с точки зрения применения системы CIP. Процесс мойки по своему характеру является в значительной степени химическим, результатом чего служит применение распылителей и рециркуляции раствора под давлением по магистралям и оборудованию. Большое значение имеют также объем, качество и надежность технического обслуживания, зависящего от производителя и/или поставщика моющих средств. Тем не менее в оценке возможностей и надежности технического обслуживания может оказаться полезным знание персоналом основ мойки элементов оборудования пищевых производств.

Подробный анализ процессов мойки и дезинфекции представлен в работе [21]. Мы же рассмотрим практический опыт трех десятилетий, который доказывает, что оставляемые продуктом загрязнения, с которыми приходится сталкиваться в ходе работы с жидкими и полужидкими пищевыми продуктами, могут быть удалены одним из описанных ниже методов или их комбинированием:

**Хлорированные щелочи.** В своей простейшей форме такой химический раствор представляет собой ничто иное, как слабый раствор каустической соды с добавлением жидкого гипохлорита натрия. Для контроля степени жесткости воды чаще используется хелатное каустическое вещество. Концентрация ще-

лочи может варьироваться от низкого уровня в 800–1200 частей на миллион (ppm) для слабо загрязненного оборудования и до максимального уровня в 5000 ppm. Используемые в процессе мойки температуры, как правило находятся в диапазоне от 130 до 165 °F, а продолжительность воздействия (рециркуляция под воздействием температуры) может колебаться от 5 до 20 мин.

**Ополаскивание кислым раствором.** Для удаления основной части хлорированных щелочных растворов с поверхностей оборудования применяется ополаскивание с использованием чистой воды, которую впоследствии сливают. Чтобы свести к минимуму количество потребляемой для ополаскивания воды, окончательное ополаскивание осуществляется рециркулированным раствором, слегка подкисленным фосфорной кислотой (совместимой с пищевыми продуктами), результатом чего является достижение уровня pH в диапазоне от 5,5 до 6 (слегка отличного от нейтрального). Этот раствор, рециркулированный при температуре подачи воды, нейтрализует все следы щелочных остаточных пленок на поверхностях оборудования. Дополнительным преимуществом такого ополаскивания является возможность обеспечения слива и высыхания, не оставляющих после себя пятен. В заключение следует сказать о том, что хотя слабокислый раствор и не является веществом, разрешенным для ведения санитарной обработки, он тем не менее обладает способностью останавливать рост микроорганизмов и его применение в качестве компонента для окончательного ополаскивания снижает или замедляет рост любых микроорганизмов, появившихся в результате процесса подачи воды или оставшихся из-за некачественной мойки.

**Химически активные (концентрированные) щелочи.** Для обработки значительных жировых и белковых загрязнений возможно использование исключительно хелатных каустических веществ, применяемых при более высокой концентрации и температуре. Концентрация химикатов может варьироваться от 0,5% (5000 ppm) до максимума в 50 000 ppm. Температуры рециркуляции могут быть повышены до уровня в 180–190 °F, а период рециркуляции увеличен до 45–60 мин. Это типично для обработки используемых в производстве молока быстродействующих высокотемпературных пастеризационных станций (HTST), пивоваренных чанов или испарителей сыворотки.

**Химически активные (концентрированные) кислоты.** Предшествовать вышеописанной обработке или же следовать за ней может процесс рециркуляции концентрированного кислого раствора, причем к наиболее часто используемым кислотам относится фосфорная. Она добавляется для получения низкого уровня кислотности (pH 2,0), причем температуры рециркуляции могут находиться в диапазоне от 170 до 190 °F несмотря на то, что время обработки, как правило, будет меньше применяемого в ходе работы со щелочными растворами (максимум от 20 до 30 мин). Решение о том, какой из растворов применять в первую очередь, будет зависеть от преимущественного наличия в составе загрязнения жира или белка. Загрязнения с высоким содержанием жира проще всего удаляются при использовании концентрированных щелочных растворов, после чего для удаления остаточных минеральных отложений, а также отложений, вызванных жесткостью использовавшейся в процессе при-

готовления моющего раствора воды, рекомендуется применять кислоту. Загрязнения с высоким содержанием минеральных веществ более чувствительны к предварительному применению кислоты, за которым следует обработка щелочным составом.

**Санитарная обработка.** Все оборудование, используемое для изготовления продуктов, продаваемых свежими (например, цельное молоко, творог, мороженое и др.), после завершения мойки и до начала технологического процесса в соответствии с нормативами должно проходить санитарную обработку. Наиболее часто для санитарной обработки применяется холодный раствор гипохлорита натрия с концентрациями от 55 до 200 ppm. Продолжительность обработки составляет всего несколько минут.

#### 15.3.3.1.3 Внешние энергетические факторы

Процесс мойки может быть усовершенствован за счет дополнительного привлечения «внешних энергетических факторов», а также благодаря увеличению физического воздействия и температур. Ниже эффективно используемое время будет рассматриваться в качестве внешнего фактора. Каждая из названных характеристик может изменяться независимо друг от друга с целью адаптировать определенную выполняемую в процессе мойки работу к определенной проблеме или методу работы производства. Условия, как правило, выбираются таким образом, чтобы добиться оптимальных результатов мойки при наименьших затратах. Важность различных факторов варьируется в зависимости от используемого способа мойки, а также от типа и характера того загрязнения, которое предполагается удалить.

**Температура.** В процессе мойки температура имеет очень важное значение. Увеличение температуры приводит к следующим последствиям: а) снижению связывающей силы между загрязнением и поверхностью, б) уменьшению плотности и увеличению эффекта турбулентности, в) увеличению растворимости растворимых веществ и г) увеличению скорости химических реакций. Для молочных продуктов в пределах температурного диапазона от 90 до 185 °F увеличение температуры на 18° примерно вдвое повышает эффективность мойки. При температуре ниже 90 °F молочный жир сохраняется в твердом состоянии, а при температуре, превышающей 185 °F, тепловые взаимодействия крепче связывают белок с поверхностью и снижают эффективность мойки. Для любого пищевого загрязнения минимальная эффективная температура должна быть приблизительно на 5° выше температуры плавления жира. Максимальная температура будет зависеть от той температуры, при которой белок в системе изменяет свои естественные свойства (денатурирует). Температуры, превышающие точку денатурации, могут усилить связь белка с поверхностью быстрее, чем сможет быть увеличена эффективность процесса мойки.

**Время.** При постоянстве всех прочих факторов эффективность мойки можно повысить за счет увеличения ее продолжительности, однако увеличение времени сверх определенного значения дает лишь незначительный прирост эффективности процесса. Как уже упоминалось ранее, существует минимальное время, необходимое для эффективной мойки, и основанное на опыте максимальное время, которое требуется для достижения желаемых экономически обоснованных результатов.

**Физические воздействия.** При мойке, осуществляемой вручную, физическое воздействие достигается за счет тяжелой работы, тогда как в системах *CIP* то же самое воздействие обеспечивается посредством использования потока жидкости. Первоначально (при использовании в качестве средства измерения силы жидкого потока его скорости) нормирующие органы ввели правило, в соответствии с которым скорость должна была составлять 5 футов/с. Несмотря на то что данное значение все еще упоминается в инструкциях, эффективность процесса мойки может быть обеспечена и при скорости ниже 5 футов/с. Причиной этого является неодинаковое соотношение между турбулентностью, фактически определяющей моющее усилие, и скоростью при определенных состояниях потока. Чтобы быть эффективным, поток жидкости должен быть турбулентным (в системах трубопроводов число Рейнольдса выше 4000). Как правило, добиться наибольшей эффективности позволяют значения, превышающие 4000 (для систем трубопроводов), причем добиться их не так сложно.

### 15.3.3.2 Стандартные программы мойки

Для работы с любой из известных программ не существует единственно верного способа, поскольку, как уже говорилось в предыдущих разделах, эффективность механической или химической мойки зависит от нескольких факторов — времени, температуры, концентрации и физических воздействий. Особо следует подчеркнуть тот факт, что если по завершении моечного цикла оборудование останется грязным, точные или конкретные числа (как часть даваемых рекомендаций) не принесут никакой пользы. Главная цель — «сделать все возможное для очистки оборудования», и лишь затем осуществляются дальнейшие регулировки, в ходе которых следует принимать во внимание ограничения, касающиеся температуры, времени или стоимости моющего средства.

В результате проверки правильности выбора моющего вещества является степень его эффективности при практическом применении в существующих условиях производства. До начала оценки эффективности моющего вещества следует обратить особое внимание на необходимость обеспечения «технической чистоты» каждой из проверяемых поверхностей. Чтобы проверяющий имел возможность заметить минеральные «каменные» отложения, поверхность должна быть высушена и, кроме того, ее необходимо нагреть, что позволит заметить наличие белковых пленок. Внешний прожектор мощностью в 150 Вт, удерживаемый на расстоянии 12–15 дюймов от поверхности, поможет высушить поверхность и заметить отложения. Белковые пленки похожи на алюминий, подвергшийся погодному воздействию. Белковые пленки можно отличить от минеральных отложений путем скобления смежных высушенных поверхностей неразбавленным выводителем молочного камня или раствором хлорированной щелочи четырехкратного разведения. Кислота удалит минеральный камень, а хлорированная щелочь удалит белковую пленку. Предлагаемый метод эффективен за исключением тех случаев, когда наслоение велико или состоит из перемежающихся слоев белка и минеральных веществ.

### 15.3.3.3 Контролируемый слив сточных вод для предварительной очистки

Сбросы с агрегатов *CIP* и технологических систем, сконструированных с расчетом на возможность осуществления мойки *CIP*, содержат значительные количества не-



органических веществ и химикатов. При планировании монтажа новых установок рекомендуется принимать во внимание необходимость разделения дренажных стоков от больших участков пола и санитарного оборудования. В конечном счете, бывает необходимо обработать моющие растворы до их слива в установки, предназначенные для очистки сточных вод. Должным образом сконструированные системы CIP «одноразового» применения, оборудованные резервуарами для восстановления растворов, позволили добиться промежуточного решения проблемы контроля сброса химикатов и биохимической потребности в кислороде (БПК), поскольку конечным результатом такой процедуры является разбавление небольшого объема концентрированного моющего раствора с высокой БПК посредством двух- или трехкратного количества воды, используемой при последующих промывках, после чего разбавленная смесь небольшими дозами подается в коллектор, что является частью программы осуществления «ударного» предварительного ополаскивания. В настоящее время к некоторым предприятиям пищевой промышленности предъявляются требования монтажа между станциями CIP установок, предусматривающих локальную обработку стоков и резервуаров с нейтрализующим раствором.

#### 15.3.3.3.1 Оценка результатов

Существует возможность разработки и применения оборудования и программ, обеспечивающих достижение физически чистых и практически не подверженных бактериальному загрязнению поверхностей, вступающих в контакт с пищевыми продуктами. Существует также большое количество новых и строгих методов определения эффективности мойки CIP, но наиболее простые из них являются, как правило, и наиболее совершенными. После завершения программы CIP оборудование должно а) выглядеть чистым, б) быть чистым на ощупь, в) не иметь постороннего запаха. Для продуктов, которые подвергаются дальнейшему микробиологическому разложению, прекрасным средством для обеспечения долговременной оценки используемых способов мойки и санитарной обработки является проверка сроков хранения.

Результатом стандартных бактериологических испытаний с помощью тампонов для просеивания бактерий на оборудовании, прошедшем мойку CIP, в 75–80% образцов должны стать стерильные пластины (без разрастания). На оставшиеся образцы должны приходиться пластины, на которых находится не более 2–10 колоний. Данные результаты относятся к тем случаям, когда выборка образцов осуществляется сразу после мойки и до начала процесса санитарной обработки. В случае правильного обращения с оборудованием ни на одном из тампонов, взятом с поверхности оборудования, прошедшего CIP-мойку, не должно оказаться коли-бактерий.

К другим методам оценки эффективности процесса CIP относятся:

**Оценка при помощи невидимого излучения.** Интенсивный флюоресцентный свет позволяет определить наличие очень мелких органических остатков, так как жировые и белковые загрязнения будут флюоресцировать под воздействием невидимого излучения. Этот метод использовался на ранних стадиях разработки и оценки возможностей применения как шариковых распылителей, так и программ CIP вообще. Для обмазывания поверхностей резервуаров или распыления на них использовалась культивированная пахта, после чего загрязнения высушивались посредством



инфракрасного света. Проверка посредством невидимого излучения осуществлялась после выполнения программы СШЗ. Применение этой процедуры с последующими модификациями поможет понять и оценить значение времени, температуры и концентрации после первого и третьего ополаскивания, после рециркуляции воды без нагрева и химикатов в течение обычно используемого для мойки времени, затем с добавлением химикатов, но без нагрева, а на заключительном этапе — после выполнения всей программы. Такой подход дает возможность распознать разницу в удалении органических веществ. Предлагаемая процедура также показывает, что при работе исключительно с водой загрязнения удаляются только в тех местах, на которые попадают струи, тогда как после добавления химикатов и включения в процедуру переменных температуры и времени мойка осуществляется на других участках скорее за счет химического воздействия, чем за счет столкновения струй воды с поверхностью.

**Тесты с использованием микроэлементов.** Некоторые предприятия фармацевтической промышленности используют микроэлементы, присутствие незначительных количеств которых может быть зафиксировано при помощи измерительных приборов. Здесь, однако, предварительным условием являются тесты с помощью тампонов для просеивания бактерий. Использование такого подхода предполагает первоначальное определение предполагаемых проблемных участков, а затем применение тампонов для удаления остаточных загрязнений (если таковые имеются), которые впоследствии могут быть удалены посредством процедуры инструментального анализа.

**Снижение уровня хлора.** Этот метод более применим для трубопроводов, чем для резервуаров, поскольку если все важные поверхности резервуара загрязнены и не охватываются разбрызгиванием моющего раствора, то такое загрязнение не будет влиять на снижение уровня хлора. Принцип данного метода очень прост: при его использовании органические вещества окисляются слабым раствором хлора, концентрация которого затем резко снижается. Соприкосновение 55 ppm холодного хлора с незначительным количеством органического вещества ведет к снижению уровня хлора, а снижение концентрации с 55 ppm до 50 или 45 ppm с последующей кратковременной рециркуляцией чистой хлорированной воды по трубопроводу или резервуару будет указывать на то, что некое органическое вещество не было удалено в процессе предшествовавшей проверки мойки CIP, и что именно оно вступило с хлором в контакт.

## 15.4 Экономические аспекты

Эффективное внедрение автоматизированной технологии CIP в систему переработки пищевых продуктов несет с собой множество преимуществ, к которым можно отнести следующие:

- устранение вероятности ошибки оператора (субъективной ошибки) и обеспечение равномерности мойки, ополаскивания и санитарной обработки, которых невозможно достичь в случае применения процедур мойки оборудования вручную;

- повышение степени безопасности для занятого в производстве персонала и персонала, занимающегося мойкой оборудования;
- повышение производительности за счет снижения времени простоя; прошедшее мойку CIP оборудование, как правило, в меньшей степени нуждается в техническом обслуживании, что снижает и время простоя, необходимое для проведения технического обслуживания;
- CIP позволяет использовать современную компьютерную технологию регулирования процесса мойки и обеспечивает соответствие всем необходимыми параметрам;
- должным образом разработанные процессы CIP дают возможность использования органов управления и вспомогательных систем, то есть автоматических систем нагнетания воздуха, способствующих снижению потерь в процессе производства;
- тщательная разработка процесса CIP помогает снизить число случайных повреждений продукции, вызванных ошибками операторов, что в свою очередь косвенно уменьшит потери продукта.

Довольно редко на основании любых сочетаний вышеизложенных пунктов удается рассчитать коэффициент «затраты/прибыль». Тем не менее вышеперечисленные преимущества зачастую способствуют возможности внедрения конкретного технологического процесса за счет эффективной работы с такими факторами, как размер, скорость и комплексность, с которыми непросто справиться посредством ручного управления или мойки вручную. В дополнение к перечисленным выше преимуществам наиболее заметными экономическими факторами при использовании мойки CIP являются снижение затрачиваемых на мойку усилий, а также уменьшение потребления воды и химических веществ.

Конечная стоимость автоматизации процесса CIP зависит от комплексности системы, а при работе с жидкостями эта комплексность, в свою очередь, зависит от количества и размера вовлеченных в процесс резервуаров. На каждый из резервуаров на 500, 5000 или 50 000 галлонов приходится определенная часть тех компонентов, которые необходимы для мойки и управления процессом. Стоимость монтажа и обслуживания высокоавтоматизированных систем может быть в значительной степени снижена за счет а) упрощения процесса на основании количества комбинаций ежедневно производимых продуктов/упаковок, б) использования резервуаров с моющим раствором и резервуаров хранения максимального размера и в минимальном количестве. Осознание этого факта пивоварами и работниками молочной промышленности нашло свое отражение в широком распространении очень больших резервуаров, сконструированных по большей части по принципу силосов, поскольку опыт показал, что предпочтительнее расходовать средства на резервуары (что позволяет уменьшить затраты на клапаны, измерительные приборы и органы управления, а следовательно и на техническое обслуживание более комплексных систем).

Характер инженерного проектирования системы CIP включает в себя стоимость стандартных систем, в которые входят капитальные отдельные питающие и возвратные трубопроводы, тогда как комплексная конструкция доводит до максимума использование сетей трубопроводов, клапанов и насосов для перемещения промывоч-

ных, моющих и ополаскивающих растворов. Несмотря на то что стоимость включения системы *CIP* в существующий технологический процесс может быть довольно значительной, при ее правильном включении в разработку нового производственного процесса стоимость компонентов *CIP* зачастую может составить всего 2–3% от общего бюджета проекта. Несколько крупных производств молочной промышленности нового поколения выработали некоторые примерные соотношения стоимости системы *CIP* к общей стоимости всего технологического процесса (см. ниже).

**Пример 1.** Капитальный ремонт и расширение производства (оборудования) для культивированного продукта, не требующие дополнительных площадей, потребовали следующих затрат:

Затраты на систему <i>CIP</i>	\$22 400
Затраты на полностью автоматизированную сеть трубопроводов	\$76 000
Затраты на основное оборудование	\$150 000

при предусмотренных в бюджете капитальных затратах в \$1 000 000. Следовательно, на систему *CIP* пришлось 10% стоимости технологического оборудования и системы трубопроводов.

**Пример 2.** Новая установка для культивированного продукта (с учетом дополнительных площадей) потребовала следующих затрат:

Затраты на систему <i>CIP</i>	\$6 000
Затраты на полностью автоматизированную сеть трубопроводов	\$44 000
Затраты на основное оборудование	\$70 000

при предусмотренных в бюджете капитальных затратах в \$1 000 000.

**Пример 3:** Новая установка по изготовлению мороженого, не требующая дополнительных площадей, потребовала следующих затрат:

Затраты на систему <i>CIP</i>	\$7 000
Затраты на полностью автоматизированную сеть трубопроводов	\$60 000
Затраты на основное оборудование	\$100 000

при предусмотренных в бюджете капитальных затратах в \$1000000.

Похожих результатов удалось добиться при использовании системы *CIP* в технологических процессах, не связанных с пищевыми продуктами. Максимальное использование комплексных сетей трубопроводов системы *CIP* на очень большой и комплексной биотехнологической установке привело к тому, что сметные затраты на эту систему составили менее 2% от стоимости проекта, и это несмотря на то что соответствующие компоненты были полностью изготовлены из нержавеющей стали марки 316 с электрополировкой.

Другой пример, описанный в работе [20], касается комплексного процесса, направленного на очистку от семи сильных соединений загрязнений с низкой концентрацией. Задачи, поставленные перед конструкцией системы мойки технологической установки, были разработаны посредством сравнения с существующим «однотипным» производством, в котором переход от изготовления одного продукта к другому осуществлялся при мойке оборудования вручную. Эти задачи включали в себя:

- достижение контролируемого загрязнения менее 10 ppm. «Однотипному» предприятию удалось добиться всего 200 ppm;
- достижение полного производственного цикла менее чем за 3 дня. «Однотипному» предприятию потребовалось 14 дней;
- наличие большей безопасности за счет устранения:
  - струйной очистки водой;

- резервуарных люков;
- необходимости демонтажа оборудования;
- снижение водных стоков и органических отходов на 80% (на однотипном предприятии при переходе с изготовления одного продукта на изготовление другого наблюдался рост количества отходов);
- снижение затрат труда, необходимых для перехода на новую продукцию.

Значительная часть сети трубопроводов была облицована тефлоном или жаропрочным сплавом на никелевой основе (фирмы *Hastelloy*). Клапаны были изготовлены из жаропрочного сплава на никелевой основе. Питающие и возвратные трубопроводы (*CIPS/R*) представляли собой систему трубопроводов из нержавеющей стали марки 316 с тройными перекидными калачами на фланцевое соединение с клапаном *hastelloy*, соединенного с тефлоновым трубопроводом или трубопроводом *hastelloy*, идущим на трубопровод подачи жидкости на распылители и сами распылители.

Валовые издержки на систему *CIP*, которые включали в себя непосредственно стоимость самой системы плюс стоимость внесения изменений в технологическое оборудование, способствующих его чистке, составили всего 3,3% от общих капиталовложений. Сюда входят проектирование, оборудование, трубопроводы, расширение распределенной системы управления (*DCS*), контрольно-измерительные приборы, программирование, работа и контроль за исполнением. Затраты на руководство проектированием и сооружением системы *CIP* составили 6% от общих затрат на осуществление руководства проектом.

Несмотря на то что упомянутые выше проекты невозможно напрямую сравнивать между собой ввиду значительных различий в их объеме и стоимости основного оборудования, эти примеры доказывают, что затраты на систему *CIP* представляют собой незначительную часть от общего бюджета новой установки — так же, как стоимость форсунок для мойки резервуара составляет лишь небольшую часть от стоимости самого резервуара. Все процессы, о которых говорилось выше, касаются работы с жидкостями и в них используется оборудование, которое уже было сконструировано с учетом технологии *CIP*. Стоимость системы *CIP* для процесса, подразумевающего работу с сухим продуктом, будет включать некоторое увеличение расходов на внесение изменений в оборудование, позволяющих подвергать его безразборной мойке.

## 15.5 Краткие выводы

Современному пищевому производству, вырабатывающему жидкие, полужидкие и твердые пищевые продукты, при конструировании следует принимать во внимание результаты значительного развития технологий и участвующего в них оборудования, которые были достигнуты на протяжении последних 40 лет. На протяжении 1960–1970-х гг. мойка *CIP* была признана своего рода «ключом», способным открыть двери на пути ко многим другим изменениям в технологии молочной промышленности и пищевой промышленности вообще. Мойка *CIP* дала толчок к развитию цельносварных систем трубопроводов, расширению использования пневматических гиги-

енических клапанов, которые могли быть вымыты без их разборки, а также к заметному увеличению размеров резервуаров для моющих растворов и хранения продукта (в сравнении с теми резервуарами, которые промывались вручную). На протяжении этого времени процедуры *CIP* широко применялись во многих отраслях пищевой промышленности, связанных с производством напитков, на предприятиях, не относящихся к молочной промышленности (включая пивоварение, виноделие, мясную промышленность), а также на предприятиях, изготавливавших сухие или полужидкие продукты на оборудовании из нержавеющей стали. Способы эффективной интеграции основного оборудования и соединительных трубопроводов, снижающие необходимость использования ручного труда (как в процессе производства, так и в процессе мойки), также внесли свой вклад в повышение и устойчивость качества продукта и снижение производственных потерь.

Из-за комплексности систем трубопроводов и пневматических клапанов оборудование, участвующее в автоматизированном технологическом процессе, должно быть рассчитано на мойку *CIP*, в связи с чем эту технологию зачастую называют автоматизацией производства/*CIP*. Данная терминология не ограничивается исключительно новыми производствами. Строгое следование соответствующим концепциям конструирования и его основным принципам позволило в течение 30 лет в молочной промышленности осуществить модернизацию многих существующих производств и увеличить производственные мощности в три-пять раз, в первую очередь дополняя при этом вспомогательные участки, необходимые для работы с упаковкой и хранением продукции в холодильниках и в сухом состоянии. Увеличения мощности производства и работы упаковочного оборудования можно добиться за счет замены первоначально смонтированного оборудования на более быстродействующее, что часто осуществимо на тех же площадях и с использованием прежних органов управления.

Существующее оборудование, участвующее в технологическом процессе изготовления мясных и зерновых продуктов, а также продуктов быстрого питания, до очередного запуска по большей части моется и проверяется вручную. В процессе мойки *CIP* без наличия специальных средств проверки могут использоваться только сварные трубопроводы и резервуары силосного типа (в соответствии со стандартами 3-A для молочной и многих других отраслей пищевой промышленности). Как правило, основным препятствием в разработке процесса *CIP* являются отверстия, необходимые для мойки оборудования вручную, а также для его проверки. Обеспечение возможности проверки и мойка *CIP* не всегда совместимы, и поэтому при разработке критериев каждого из этих процессов необходимо добиться их согласования.

## Глоссарий

***CIP, Clean-in-Place*, безразборная мойка.** Этот процесс также носит название безразборной рециркуляционной мойки. Удаление загрязнений с технологического оборудования и трубопроводов за счет рециркуляции или разбрызгивания промывочных, моющих и ополаскивающих растворов.

**Одноразовая система CIP.** Система, разработанная для одноразового использования минимального количества свежего моющего раствора, который затем сливается в канализацию или передается в резервуар для восстановленного моющего раствора.

**Многоразовая система CIP.** Система, разработанная для повторного использования больших резервуаров с химическими растворами за счет слива и обновления небольшого количества раствора после или же в процессе осуществления каждого из последовательных циклов CIP.

**Струйная мойка.** Мойка, осуществляемая за счет постоянного разбрызгивания растворов на верхние участки резервуара, бункера (силоса) или корпуса (кожуха), и удаления загрязнения посредством химического воздействия.

**Мойка под давлением.** Мойка, осуществляемая за счет прокачивания растворов по трубопроводам или оборудованию при достаточной скорости. Скорость, как правило, составляет 5 футов/с, что позволяет обеспечить заполнение всех участков трубопровода.

**Оборудование, поддающееся мойке CIP.** Отдельный компонент оборудования или вся технологическая линия, разработанные для обеспечения возможности струйной рециркуляции моющих растворов или их рециркуляции под давлением для обеспечения контакта промывочного, моющего и ополаскивающего растворов со всеми загрязненными поверхностями.

**Станция CIP.** Комбинация резервуаров, клапанов и насоса(ов) для подачи промывочного, моющего и ополаскивающего растворов.

**Система питающих и возвратных трубопроводов CIP.** Трубопроводы, смонтированные для передачи моющих растворов от станции CIP на промываемый участок и обратно.

**Шариковое распылительное (разбрызгивающее) устройство (форсунка).** Деталь сферической формы из нержавеющей стали, в которой просверлены отверстия таким образом, чтобы обеспечивался определенный рисунок распыления (разбрызгивания).

**Трубчатое распыляющее (разбрызгивающее) устройство (форсунка).** Прямая или изогнутая трубка из нержавеющей стали с наполовину просверленными сферическими секциями, каждая из которых обеспечивает тот или иной рисунок распыления (разбрызгивания).

**Предохранительный клапан.** Отдельный клапан со сдвоенным седлом, предотвращающий ненамеренное смешение технологических жидкостей путем выпуска их в атмосферу при сбоях в работе отдельных частей системы CIP.

## Использованные сокращения

БПК (*BOD*) — биохимическое потребление кислорода.

*CHS (Cleaning Hook-up Station)* — панель с перекидными калачами. Панель из нержавеющей стали с отверстиями для U-образного сочленения трубопроводов подачи и возврата.

*CIP (Clean-In-Place)* — безразборная мойка, мойка *CIP*.

*CIPS (Clean-In-Place Supply piping system)* — сеть трубопроводов для подачи растворов *CIP*.

*CIPR (Clean-In-Place Return piping system)* — сеть трубопроводов для возврата растворов *CIP*.

*CIPS/R (Clean-In-Place Supply/Return piping system)* — сеть трубопроводов для подачи и возврата растворов *CIP*, необходимая для доведения (отведения) к/от технологического оборудования промывочных, моющих и ополаскивающих растворов.

*CSP (Cleaning Supply Pump)* — нагнетающий насос станции *CIP*.

*DCS (Distributed Control System)* — распределенная система управления.

*FCV (Flow Control Valve)* — клапан управления потоком для управления скоростью подачи растворов *CIP*.

*HTST (High-Temperature Short-Time)* — быстродействующая высокотемпературная. Применяемая обычно система пастеризации молочных продуктов.

*PHS (Product Hook-up Station)* — панель с перекидными калачами для продуктовых трубопроводов. Панель из нержавеющей стали с отверстиями для U-образного сочленения продуктовых трубопроводов и трубопроводов *CIP*.

*ПИД, PID (Proportional Integral Derivative Control)* — пропорционально-интегрально-дифференциальное регулирование.

*PLC (Programmable Logic Controller)* — программируемый контроллер.

*ПВХ, PVC* — поливинилхлорид, поливиниловый.

*RP (Return Pump)* — рециркуляционный насос (насос возврата моющего раствора)

*SUEA (Single Use Eductor Assisted)* — устройство на базе эжектора одноразового действия.

## Литература

1. Bonem, F. L. Single operator controls complex operation // Food Processing. — 1960. — № 2 (July). — P. 36–38.
2. Fleischman, F. F., Jr., White, J. C., and Holland, R. F. Glass lines: do A-1 job; no take-down to clean // Food Ind. — 1950. — № 22(10). — P. 1686.
3. Havighorst, C. R. Revolutionary advance in dairy engineering: permanent welded pipelines // Food Eng. — 1951. — № 23(9). — P. 74–79.
4. Sanitary standards for caged-ball valves for milk products / International Association of Milk, Food and Environmental Sanitarians. — Ames, Iowa: Int. Assoc. Milk Food Env. San., 1986. — No. 605-02. — 3-A.
5. Sanitary standards for caged-ball valves for milk and milk products / International Association of Milk, Food and Environmental Sanitarians. — Des Moines, IA: Int. Assoc. Milk Food Env. San., 1995. — No. 66-00. — 3-A.
6. Johnson, C. R. Automated CIP improves quality of product // Food Processing. — 1960. — № 1 (June). — P. 36.
7. Karpinsky, K. L. and Bradley, R. L., Jr. Assessment of the cleanability of air-actuated butterfly valves // J. Food Protect. — 1988. — № 51 (May). — P. 364–368.

8. Kaufmann, O. W., Hendrick, T. I., Pflug, I. J., Pheil, C. G., and Keppeler, R. A. Relative cleanability of various stainless steel finishes after soiling with inoculated milk solids // *J. Dairy Sci.* — 1960. — № 43(1). — P. 28–41.
9. Olenfalk, L. O. Personal correspondence regarding internal report. — 1975.
10. Olenfalk, L. O. Detailed economical and technical study of various cleaning systems // *Mjolkcentralen Internal Rep.* — 1975.
11. Parker, R. B., Elliker, P. R., Nelson, G. T., Richardson, G. A., Wilster, G. H. Cleaning pipelines in-place // *Food Eng.* — 1953. — № 25 (Jan). — P. 82–86, 176–178.
12. Richter, R. L., Bailey, J., and Frye, D. D. A field study of bulk milk transport washing systems // *J. Milk Food Technol.* — 1975. — № 38(9). — P. 527–531.
13. Seiberling, D. A. An Ohio plant applies automation to the cleaning-in-place operation // *Am. Milk Rev.* — 1955. — № 17 (Feb). — P. 32–34.
14. Seiberling, D. A. Equipment and process design related to mechanical/chemical cleaning procedures // *Proc. Chem. Eng. Progr. Symp.* — 1968. — № 64(68). — P. 94–104.
15. Seiberling, D. A. Automated cleaning of brewing vessels and lines // *Master Vrewers Assoc. Am. Tech. Q.* — 1970. — № 7(1). — P. 73–80.
16. Seiberling, D. A. Process/CIP engineering for shelf-life improvement // *Am. Dairy Rev.* — 1979. — № 41(10). — P. 14–22, 64–67.
17. Seiberling, D. A. and Harper, W. J. Ball spray cleaning of storage tanks and pick-up tankers // *Milk Dealer.* — 1957. — № 46(4). — P. 40–41, 48.
18. Seiberling, D. A. and Harper, W. J. Automatic sanitary valves for dairy plants // *American Milk Rev.* — 1957. — № 19(1). — P. 30–31, 34.
19. Sheuring, J. J. and Henderson, H. B. *South. Dairy Prod. J.* — 1951. — P. 49, 52–53, 64–65.
20. Stewart, J. C. and Seiberling, D. A. CLEAN in Place: Are you ready? // *Chem. Eng.* — 1996. — № 103(1). — P. 72–79.
21. Tamplin, T. C. CIP technology, detergents and sanitizers // *Hygienic Design and Operation of Food Plant* / Jowitt, R. (ed.). — Westport, CT: AVI Publishing, 1980. — P. 183.
22. Thom, E. Glass sanitary piping in dairy plants // *The Milk Dealer.* — 1949. — № 39(1). — P. 42.
23. Zoltai, P. T., Zottola, E. A., and McKay, L. L. Scanning electron microscopy of microbial attachment to milk contact surfaces // *J. Food Protect.* — 1981. — № 44(3). — P. 204–208.



# 16 УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

*Давид Бреснеен*

*Перевод Н. Савченкова под ред. д-ра техн. наук, проф. В. А. Балюбаши*

## СОДЕРЖАНИЕ

- 16.1 Введение
  - 16.1.1 Определение
  - 16.1.2 Зачем нужно автоматическое управление?
- 16.2 Модель технологического процесса
- 16.3 Элементы контура управления
  - 16.3.1 Датчики
  - 16.3.2 Определение размеров регулирующих клапанов
- 16.4 Динамика технологического процесса
  - 16.4.1 Процессы первого порядка
- 16.5 Режимы регулирования
  - 16.5.1 Режим двухпозиционного регулирования (Вкл/Выкл)
  - 16.5.2 Пропорциональное регулирование
  - 16.5.3 Интегральное регулирование
  - 16.5.4 Регулирование по производной
  - 16.5.5 Комбинированные режимы регулирования
- 16.6 Настройка регулятора
  - 16.6.1 Автоматическая настройка
  - 16.6.2 Выявление неисправностей в контуре регулирования
- 16.7 Методы регулирования
  - 16.7.1 Обозначения процессов и измерительных приборов на чертежах
  - 16.7.2 Регулирование с отрицательной обратной связью
  - 16.7.3 Регулирование с опережающей обратной связью
  - 16.7.4 Регулирование по соотношению
  - 16.7.5 Контроль внешних условий
  - 16.7.6 Каскадное регулирование
  - 16.7.7 Сигналы блокировки
  - 16.7.8 Регулирование с замещением
- 16.8 Аппаратура регулирования
  - 16.8.1 Одноконтурный регулятор

- 16.8.2 Система распределенного управления
  - 16.8.3 Программируемые логические контроллеры
  - 16.9 Экономика управления технологическим процессом
    - 16.9.1 Затраты на системы регулирования
    - 16.9.2 Составление сметы на контуры регулирования
  - 16.10 Разработка системы регулирования
  - 16.11 Примеры контуров регулирования
    - 16.11.1 Теплообменники
    - 16.11.2 Нагрев и охлаждение партий продукции
    - 16.11.3 Температура в резервуарах хранения
    - 16.11.4 Печи и сушилки
    - 16.11.5 Объемный расход
    - 16.11.6 Противодействие
  - 16.12 Заключение
- Список обозначений
- Литература
- Дополнительная отечественная литература

## 16.1 Введение

### 16.1.1 Определение

Управление технологическими процессами представляет собой управление регулируемыми переменными в целях получения необходимых свойств продукта.

Приведенное выше определение не является всеобъемлющим, а относится к аспектам автоматического управления, рассматриваемым в данной главе. Управление технологическим процессом многогранно и касается как управления регулируемыми переменными в цехе, так и работы с данными производственных и корпоративных информационных систем. Ниже основное внимание будет отводиться первому из двух названных аспектов. Управление технологическим процессом в производственном цехе включает в себя как цифровое автоматическое управление, так и аналоговое автоматическое управление. Особое внимание мы уделим именно аналоговому управлению, хотя в некоторых методах используется и цифровое управление<sup>1</sup>.

### 16.1.2 Зачем нужно автоматическое управление?

С момента начала промышленной революции технология продвинулась далеко вперед. Внедрение и распространение компьютерных технологий позволило достичь большей автоматизации производственных операций.

Автоматическое регулирование обеспечивает согласованность технологических операций, снижение себестоимости и более высокую степень безопасности. Процесс, который подвержен неожиданным нарушениям, будет более надежен, если его регулируемые переменные постоянно настраиваются автоматической системой управления, за счет правильного внедрения которой возможно исключение из технологии человеческого фактора.

<sup>1</sup> Современный регулятор допустимо классифицировать как комбинированный, сочетающий аналоговый сигнал первичного преобразователя (датчика) и цифровой сигнал согласующего преобразователя. — *Прим. науч. ред.*

Увеличение надежности операций может способствовать изготовлению изделий, свойства которых находятся в пределах заданных производственных спецификаций, что в свою очередь обеспечивает повышение общего качества выпускаемой продукции. Более тщательное управление технологией может также стать причиной снижения количества изделий, не соответствующих спецификациям, увеличивая таким образом производительность.

Постоянный контроль, обеспечиваемый автоматической системой управления за счет ее ускоренной реакции на внештатные ситуации, способен повысить уровень обеспечения безопасности. Возможно также внедрение операций управления автоматической остановкой производства. Некоторые из этих операций способны защитить персонал, а другие могут предотвратить поставку потребителю некачественной продукции.

## 16.2 Модель технологического процесса

Модель технологического процесса, отражающая управление с отрицательной обратной связью, представлена на рис. 16.1. Здесь измеряется подлежащая управлению регулируемая переменная. Технологические данные сравниваются с уставкой для получения сигнала об ошибке. Сигнал об ошибке алгоритмически используется для формирования управляющего воздействия. Управляющее воздействие применяется для управления работой исполнительного элемента, реализующего управляющее воздействие на технологический процесс.

Примером управления с отрицательной обратной связью может служить ручное регулирование температуры жидкости, проходящей через паровой теплообменник, где регулирующим параметром является температура жидкости.

В качестве измерительного устройства используется индикатор температуры. Оценка того, превышена или занижена температура, дается оператором. Для проведения соответствующих регулировок используется паровой клапан. Если жидкость слишком горяча, то регулировка клапана осуществляется на его закрытие — такова концепция регулирования с отрицательной обратной связью. Корректировка положительного отклонения требует отрицательного по знаку регулирующего воздействия. Сначала диапазон осуществляемых оператором регулировок достаточно большой, но по мере приближения к необходимому заданному значению оператор осуществляет все более тонкие регулировки.

Такая последовательность осуществления регулировок типична для многих алгоритмов автоматического регулирования — чем меньше становится отклонение, тем соответственно меньше становится и управляющее воздействие.

## 16.3 Элементы контура управления

На рис. 16.1 представлен поток информации в контуре управления с обратной связью. Элементы, входящие в состав контура, могут меняться, но с сохранением функциональных признаков.

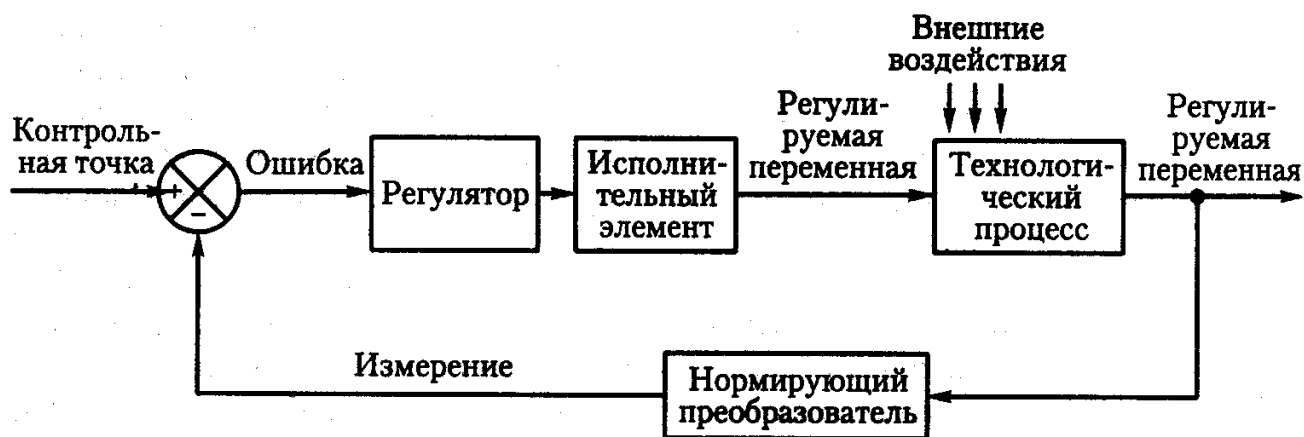


Рис.16.1. Модель процесса с обратной связью

Технологическая переменная определяется с помощью первичного преобразователя (датчика). При автоматическом регулировании этот считывающий элемент представляет собой преобразователь. Преобразователь — это устройство, производящее выходной сигнал, соотносимый с измеряемым параметром. Чаще всего преобразователь дает электрический сигнал.

Этот выходной сигнал не всегда является линейным по отношению к измеряемой переменной, и, кроме того, он не всегда такой, какой можно использовать в системе управления. Он может представлять собой слабый милливольтный сигнал, который достаточно сложно передавать на большие расстояния без внешних помех, искажающих этот сигнал и делающих его бесполезным. Сигнал от одного датчика может выражаться в вольтах, от другого — в герцах, а поступающий от третьего датчика — в амперах. В настоящее время регуляторы обладают способностью обрабатывать несколько типов входных сигналов, однако иногда более практичным и экономичным является ограничение количества различных типов входных сигналов, обрабатываемых системой управления, что позволяет сократить количество закупаемых преобразователей.

Нормирующие преобразователи (НП) представляют собой преобразователи, используемые для превращения сигнала датчика в более устойчивый и стандартизированный, часто линеаризованный по отношению к измеряемой величине переменной сигнал, который передается на регулятор. Наиболее распространенный диапазон сигнала от НП — от 4 до 20 мА. Этот электрический сигнал поддерживается благодаря источнику постоянного тока напряжением порядка 24 В. НП управляет силой тока в данном контуре. Внешние электрические помехи могут вызывать некоторое напряжение на пике этого сигнала, однако в пределах ограничений это дополнительное напряжение не влияет на работу считывающего устройства, поскольку оно реагирует на изменения силы тока. Контур с токовым сигналом от 4 до 20 мА может быть использован для приведения в действие нескольких устройств (за счет соединения их в последовательный контур) при условии обеспечения того, что общее сопротивление всех устройств в данном контуре не будет превышать возможности источника тока.

Переданный сигнал считывается регулятором, который способен интерпретировать данный сигнал и сравнить его с некоторой уставкой. Регуляторы довольно час-

то могут интерпретировать разные входные сигналы — в милливольтгах, вольтах, в миллиамперах, в герцах и т. д. Некоторые регуляторы являются полностью пневматическими, то есть они воспринимают давление воздуха, обрабатывают его, сравнивают с заданным значением и вновь выдают некоторое давление воздуха (выходной сигнал). Пневматические регуляторы в первую очередь используются в той среде, где нежелательно присутствие электрического оборудования — например, в помещениях, где осуществляется работа с взрывоопасными веществами.

В настоящее время большая часть регуляторов оснащена микропроцессорами, которые сравнивают входной сигнал с уставкой, а затем проводят расчеты, служащие для определения величины выходного сигнала. Цифровой регулятор принимает входной аналоговый электрический сигнал и в цифро-аналоговом преобразователе преобразует его в цифровой сигнал. Микропроцессор дает на выходе цифровой сигнал, который затем вновь преобразуется в аналоговый (часто в диапазоне от 4 до 20 мА), хотя возможно и получение различных выходных сигналов.

Выходной сигнал используется для настройки регулирующего элемента. Довольно часто требуется повторное преобразование сигнала. Многие регулирующие клапаны приводятся в действие пневматически, в связи с чем возникает необходимость в использовании преобразователя электрического сигнала в пневматический (Э/П). Обычно пневматический сигнал, используемый регулирующими клапанами, изменяется в диапазоне от 3 до 15 фунтов на кв. дюйм. Нередко преобразователь Э/П воспринимает входной сигнал, находящийся в диапазоне от 4 до 20 мА и выдает сигнал от 3 до 15 фунтов на кв. дюйм.

Кроме клапанов существуют и другие типы регулирующих элементов. Для регулирования объемного расхода или давления возможно использование насосов. Мощность насоса может изменяться в зависимости от изменения скорости двигателя, приводящего его в действие. Частотно регулируемый электропривод воспринимает выходной сигнал регулятора и подстраивает частоту для двигателя насоса. Таким образом, этот вариант является еще одним примером преобразования сигнала перед окончательным регулирующим элементом.

Возможности связи между устройствами в контуре регулирования постоянно развиваются. Стандарт *ISA/IEC Fieldbus* (находящийся в настоящее время в стадии разработки) позволит осуществлять сетевой обмен данными между компонентами системы регулирования. Это даст возможность обеспечить более широкий доступ к большому количеству информации с использованием меньшего количества монтажных соединений. При этом цифровая информация накладывается на обычные аналоговые сигналы, обеспечивая удаленные устройства той информацией, доступ к которой ранее был возможен только на конкретном элементе управления. Многие производители уже обеспечивают свои удаленные устройства возможностями цифровой связи, что облегчает процесс настройки и диагностики.

### 16.3.1 Датчики

В табл. 16.1 приводится перечень некоторых типов датчиков, которые могут быть использованы при управлении процессом производства пищевых продуктов. Для каждой регулируемой переменной существует несколько методов измерения, в связи с чем необходимо учитывать диапазон, точность и стоимость каждого из вариантов применения.

Таблица 16.1. Типовые датчики

Параметр	Датчик	Диапазон	Примечания
Температура	RTD (термометр сопротивления)	От -430 до 1200 °F	Наиболее распространены платиновые термометры сопротивления с сопротивлением 100 Ом. Хорошая точность. Для повышения точности рекомендуются модели с 3- или 4-проводной схемой подключения
Температура	Термопара тип J тип T тип K	От -320 до 1400 °F От -310 до 750 °F От -310 до 2500 °F	Средняя точность. Не рекомендуется применять термопары для передачи сигнала на большие расстояния из-за низкого уровня сигнала
Объемный расход	Магнитный	До 0,01 гал/мин	Требуется некоторая минимальная проводимость. Отличаются хорошей точностью
Объемный расход	Образование вихрей	До 10 гал/мин	Требуется большое число Re. Может применяться для пара, часто используется в трубопроводах CIP
Массовый расход	Кориолисный	До 0,1 фунта/мин	Очень точные. Внимание уделяется перепаду давлений. Плотность измеряется независимо. Удобны для дозирующих устройств
Массовый расход	Теплопотери	До 0,5 л/мин	Широко применяются для газов
Плотность	Вибродатчик	До 0,2 г/см <sup>3</sup>	Датчики на основе измерения силы Кориолиса обеспечивают независимое измерение плотности. Двухфазные потоки могут повлиять на надежность измерений
Плотность	ЯМР	До 0,1 г/см <sup>3</sup>	Очень точные. Удовлетворяют требованиям работы с радиоактивными материалами.
Давление	Изменение напряжений	До 2 фунт/кв. дюйм	Могут работать в условиях высоких температур (свыше 250 °F). Обычно требуют особой изоляции
Уровень	Перепад давлений	Менее 1 дюйма водного столба	Широко применяются для измерения уровня в резервуарах. Калибровка высоты зависит от плотности
Уровень	Емкостное сопротивление	Более 20 футов	Восприимчивы к контакту с продуктом
Уровень	Сопротивление	Более 20 футов	Восприимчивы к снижению контакта с продуктом
Уровень	Ультразвуковой	От нескольких дюймов до 100 футов	Бесконтактные. Проблемой является возмущение поверхности продукта. Способны определять положение границы раздела фаз «жидкость/жидкость»
Влажность	Инфракрасный	1-100%	Измерения проводятся на поверхности продукта
Влажность	Микроволновый	До более 35%	Показания зависят от плотности
Вязкость	Вибродатчик	0,1-106 сПз	Измеряет кинематическую вязкость. Может возникнуть проблема при работе вне помещений

Контактная поверхность датчиков, соприкасающихся с пищевыми продуктами, должна быть изготовлена из сертифицированных материалов. Датчики, используемые для работы с жидкостями, не требуют соответствия стандарту 3А, что означает, что датчик без дополнительного анализа со стороны инженера-разработчика может быть использован в вариантах применения, предусмотренных для безразборной мойки (CIP). В процессе, предусматривающем мойку CIP, датчики следует монтировать таким образом, чтобы свести к минимуму зону нечувствительности, а кроме того, в них должна быть предусмотрена возможность слива конденсата.

Монтаж датчиков имеет очень важное значение для правильной их работы. Температурный датчик должен в достаточной степени соприкасаться с измеряемой поверхностью. До и после датчиков расхода часто необходимо размещение прямых участков трубопровода определенной длины. Некоторые датчики чувствительны к вибрации, в то время как другие восприимчивы к электрическим помехам.

Большое значение имеет и учет той среды, в которой монтируется датчик. Корпуса датчиков, используемых в пищевой промышленности, должны быть устойчивы к воздействиям воды и пыли. Нередко использование датчиков обусловлено их соответствием характеристикам Национальной ассоциации изготовителей электрооборудования (NEMA). Такими характеристиками являются устойчивость к воздействию воды (класс 3), герметичность (класс 4) или пыленепроницаемость (класс 5).

### 16.3.2 Определение размеров регулирующих клапанов

Правильное определение размера регулирующего клапана важно для срабатывания соответствующего контура регулирования. Клапан с малой пропускной характеристикой не позволит потоку достичь верхнего предела рабочего диапазона измеряемого параметра, в то время как клапан слишком больших размеров (что встречается гораздо чаще) позволяет достигнуть верхнего предела рабочего диапазона измеряемого параметра уже при невысокой степени открытия клапана.

Чтобы достичь минимальных и максимальных эксплуатационных значений регулируемого параметра, рабочий диапазон клапана должен составлять от 5 до 85% [4].

Задание размеров клапана, как правило, выражается коэффициентом клапана  $C_v$ . В своей простейшей форме, относящейся к использованию жидкостей, этот коэффициент выражается следующим образом:

$$C_v = Q \sqrt{\frac{P_s}{\Delta P}}, \quad (16.1)$$

где  $Q$  — расход, выражаемый в гал/мин;  $P_s$  — ускорение свободного падения;  $\Delta P$  — перепад давлений (фунт/кв. дюйм).

Таким образом, клапан с коэффициентом  $C_v$ , равным 1, позволит 1 гал/мин воды при  $P_s = 1$  проходить сквозь него с перепадом давления, равным 1 фунту/кв. дюйм. Расход будет расти пропорционально квадратному корню от увеличения давления, повышаясь до того момента, пока не окажется достигнутым критический расход.

Критический расход возникает в той точке, где давление на участке, следующим за клапаном, ниже, чем упругость пара жидкости, что заставляет жидкость испаряться.

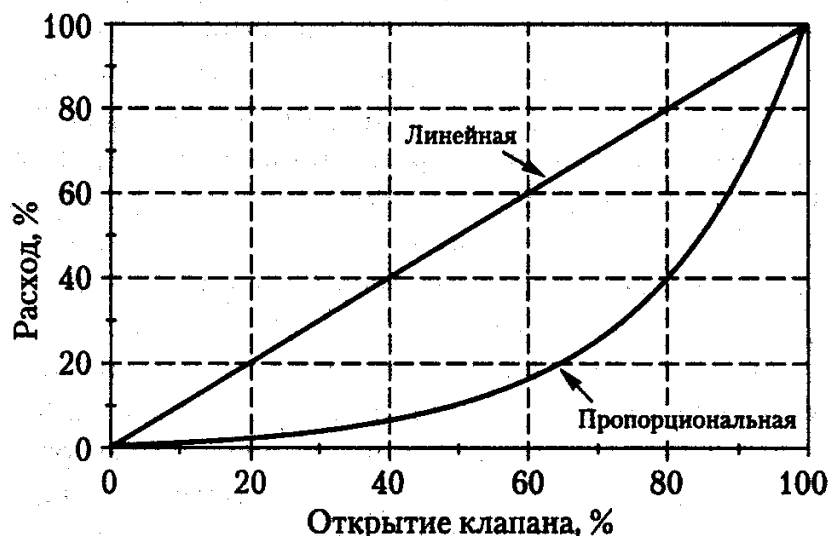


Рис. 16.2. Характеристики регулирующего клапана

В некоторой точке (ниже по течению), где давление восстанавливается до значения, находящегося в промежутке между давлением *vena contracta* (наиболее низким давлением, создаваемым по ходу потока) и давлением выше по течению, пар вновь превращается в жидкость. Это явление носит название кавитации, которая способна повредить клапан.

Следует учитывать и наличие других вариантов этого основного уравнения, например, по вязкости и расходу газа. Более подробные уравнения, касающиеся задания размера клапана управления, приведены в стандарте *ANSI/ISA S75.01-1985 (Уравнения расхода жидкости для задания размеров клапанов)*. Эти уравнения имеются и в электронной форме, кроме того, программы задания размеров предлагаются также и поставщиками клапанов.

Регулирующие клапаны изменяют проходящий сквозь них поток за счет изменения степени открытия клапана. Различные характеристики клапанов обеспечивают разное соотношение между степенью открытия клапана и расходом. Линейная и пропорциональная характеристики клапана представлены на рис. 16.2. У клапана с пропорциональной характеристикой открытия существует экспоненциальная зависимость между его открытием и расходом.

Как правило, в случае, если падение давления на клапане при минимальной и максимальной нагрузке изменяется в соотношении большем чем 2 : 1, применяется пропорциональная характеристика. В противном случае следует использовать линейную характеристику, хотя вполне вероятно, что пропорциональная характеристика клапана также позволила бы добиться приемлемых результатов [4].

## 16.4 Динамика технологического процесса

Технологические процессы нередко приходится подстраивать под различные факторы. В целях удовлетворения требований, предъявляемых к последующим операциям и эффективности установки, возможно внесение в технологию некоторых отклонений. Технологические требования также меняются в зависимости от осуществляемого на



настоящий момент этапа — например, нагрева, охлаждения и смешивания (для периодических процессов), а также стерилизации, начала подачи продукта, непрерывной обработки, прекращения работы и чистки (для пастеризатора). Даже в течение одного технологического этапа, в ходе которого производительность остается неизменной, возможны различные нарушения, которые требуют проведения соответствующих регулировок<sup>1</sup>.

Существуют некоторые динамические факторы, которые задерживают время реакции системы, в частности инерция, время задержки и *время запаздывания*.

Инерция некоторой системы выражается вторым законом Ньютона:

$$F = ma, \quad (16.2)$$

где  $F$  — сила, действующая на массу;  $m$  — масса;  $a$  — ускорение данной массы.

Понятие инерции чаще всего ассоциируется с механическими системами. Оно может иметь некоторое значение и в системах регулирования параметров потока, хотя большая часть таких систем ввиду несжимаемости жидких пищевых продуктов и при правильном выборе регулирующего устройства обладают немедленной реакцией.

В большинстве вариантов применения немедленной может считаться даже реакция несжимаемых газов с колебаниями давления, перемещающимися со скоростью звука.

Емкость — это способность некоторого компонента системы сохранять энергию. Вместе с тем, компоненты системы могут задерживать передачу энергии. Результатом взаимодействия емкости и сопротивления передаче энергии становятся запаздывание реакции систем регулирования. Если в процессе нагрева резервуара неожиданно увеличивается расход пара из-за изменения количества нагреваемого материала (резервуар и его содержимое) и изменения скорости теплопередачи, определяемой общим сопротивлением, происходит задержка системы. Задержка такого типа может быть выражена уравнением первого порядка.

$$Y = A \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (16.3)$$

где  $Y$  — реакция системы;  $A$  — амплитуда изменения на входе;  $e$  — число Эйлера (2,718...);  $\tau$  — время с момента ступенчатого воздействия;  $t$  — постоянная времени.

Время запаздывания — это задержка реакции системы, объясняющаяся, как правило, явлением переноса. Если материал в упоминавшемся ранее резервуаре будет передан по трубе к датчику температуры, то некоторая доля задержки в определении повышения температуры произойдет из-за времени, необходимого нагретой жидкости для того, чтобы достичь датчика температуры.

## 16.4.1 Процессы первого порядка

В качестве примера одной из моделей, характеризующих некоторые процессы, можно привести модель процесса первого порядка, выраженную уравнением 16.3, кото-

<sup>1</sup> Отмеченные свойства объектов регулирования следует дополнить свойством самовывравнивания. — *Прим. науч. ред.*

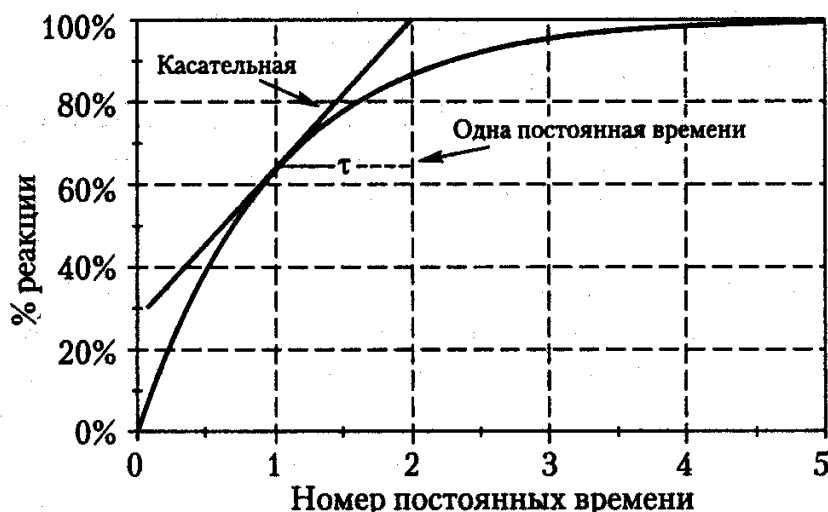


Рис. 16.3. Запаздывание реакции систем регулирования, выраженное первым порядком

рое отражает реакцию первого порядка на изменения, происходящие на входе. Как видно из рис. 16.3, характеристика процесса асимптотически приближается к новому устойчивому значению.

Касательная, проходящая в любом месте вдоль кривой, характеризующей реакцию, будет пересекать кривую 100%-ной реакции ( $\tau$ ) на расстоянии одной постоянной времени от точки, в которой берет свое начало касательная (см. рис. 16.3). На расстоянии одной постоянной времени после ступенчатого изменения реакция будет составлять 63,2% от окончательного значения. На расстоянии пяти постоянных времени реакция по существу может считаться полной, поскольку будет составлять 93,3% от окончательного значения. При проектировании контура регулирования чрезвычайно важно принимать во внимание эту постоянную времени.

## 16.5 Режимы регулирования

### 16.5.1 Режим двухпозиционного регулирования (Вкл/Выкл)

В математическом смысле этот режим (да/нет, вкл/выкл) тривиален, но он используется во многих случаях регулирования.

Двухпозиционное регулирование осуществляется за счет полного включения или отключения регулирующего элемента в ответ на изменение знака наличия ошибки. Например, при нагреве партии продукта в случае пересечения температурой точки заданного значения, клапан на стороне подачи теплоносителя отключается. После падения температуры партии обрабатываемого продукта ниже заданного значения клапан на стороне подачи теплоносителя включается вновь<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Следует учитывать, что характер переходного процесса и, соответственно, показатели качества двухпозиционного регулирования определяются также кратностью притока энергии (вещества). — *Прим. науч. ред.*

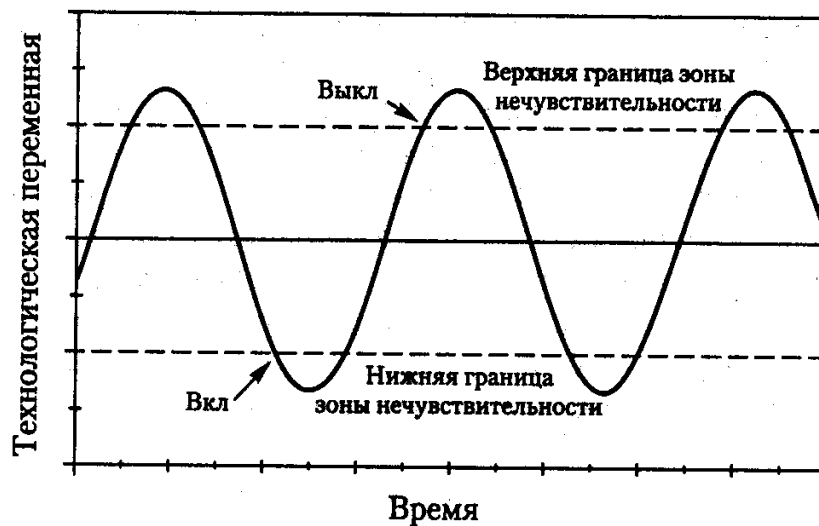


Рис. 16.4. Режим двухпозиционного регулирования (с зонами нечувствительности)

При использовании двухпозиционного метода регулирования средняя температура будет удерживаться примерно на уровне заданного значения, однако в зависимости от типа участвующей в процессе управления системы имеется возможность значительных отклонений в сторону превышения или занижения заданного значения. Этот способ регулирования, как правило, применяется при нагреве или охлаждении партий продуктов, а также в крупных резервуарах хранения продуктов и ингредиентов. Если содержимое резервуара хорошо перемешивается, способствуя таким образом достаточному теплообмену, то возможно осуществление регулирования в диапазоне от  $\pm 2$  до  $5^\circ\text{F}$ . Плохое перемешивание (теплообмен) может стать причиной медленной реакции и возникновения отклонений.

Если регулируемый параметр колеблется в пределах заданного значения достаточно быстро, то двухпозиционное регулирование может стать причиной быстрого циклического срабатывания регулирующего клапана. Для предотвращения такого срабатывания при двухпозиционном регулировании зачастую используют «зоны нечувствительности». При применении нагрева для включения клапана вводится точка, находящаяся ниже заданного значения, а для выключения клапана используется другая точка, которая превышает заданное значение (рис. 16.4).

## 16.5.2 Пропорциональное регулирование

В модели регулирования технологического процесса, изображенной на рис. 16.1, разница между заданным значением и измеряемым сигналом устанавливается по алгоритму, определяющему реакцию на управляющее воздействие. В пропорциональном регуляторе (П) это используется следующим образом:

$$O = EG + M, \quad (16.4)$$

$$E = SP - P \quad (\text{для обратного воздействия}), \quad (16.5)$$

$$E = P - SP \quad (\text{для прямого воздействия}), \quad (16.6)$$

где  $O$  — выходной сигнал регулятора;  $E$  — разница между заданным значением и измеряемым сигналом;  $G$  — коэффициент передачи пропорционального регулятора;  $M$  — постоянная регулятора, прибавляемая к результату расчета;  $SP$  — уставка, используемая в ходе процесса;  $P$  — технологическое значение.

Из уравнения 16.4 видно, что в зависимости от того, как рассчитывается разница между уставкой и измеряемым сигналом, изменения выходного сигнала регулятора могут быть обратно или прямо пропорциональны ее изменению. Регулятор обратного воздействия в ответ на возрастающую положительную разницу будет иметь понижающийся выходной сигнал. Срабатывание регулятора прямого воздействия будет противоположным, характеризующимся повышением входного сигнала при возрастании разницы.

Реакция пропорционального регулятора на разницу между уставкой и измеряемым сигналом представляет собой простую прямую линию с уклоном, равным коэффициенту передачи и отрезку на координатной оси  $Y$ , равным этому смещению.

Многие регуляторы вместо коэффициента передачи используют зоны пропорционального регулирования. Соотношение между зоной пропорционального регулирования ( $PB$ ) и коэффициентом передачи выглядит следующим образом:

$$PB = \frac{100}{G} \quad (16.7)$$

или

$$G = \frac{100}{PB} \quad (16.8)$$

Таким образом, уравнение для пропорционального регулятора, использующего зону пропорционального регулирования можно записать как:

$$O = E \frac{100}{PB} + M \quad (16.9)$$

Поскольку усиление и зона пропорционального регулирования обратно пропорциональны, то их увеличение относительно друг друга приведет к противоположному воздействию регулятора. Если увеличение усиления повышает ответную реакцию регулятора, то увеличение зоны пропорционального регулирования ее уменьшает.

Как правило, у пропорционального регулятора между заданным и измеренным значением имеется определенное смещение или статическая ошибка. На рис. 16.5 изображена реакция пропорционального регулятора на изменение уставки. Первой реакцией регулятора будет ступенчатое (шаговое) изменение, являющееся результатом ступенчатого изменения разницы. По мере реакции регулируемой системой переменной разница между заданным значением и измеряемым сигналом уменьшается и одновременно снижается выходной сигнал регулятора. Постепенно достигается равновесие, при котором разница между заданным значением и измеряемым сигналом больше не изменяется. Поскольку выход регулятора представляет собой

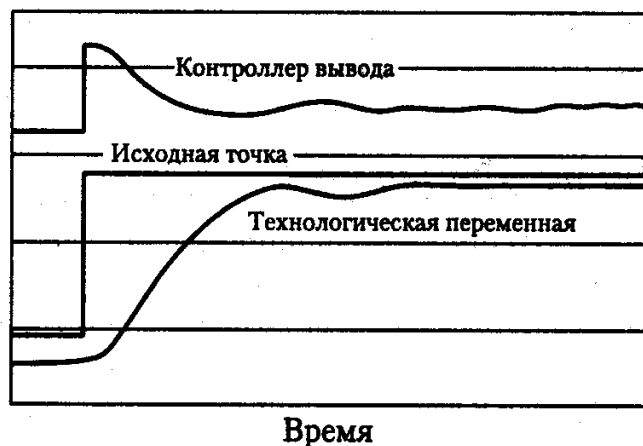


Рис.16.5. Режим пропорционального регулирования

произведение разницы между заданным значением и измеряемым сигналом и коэффициента передачи плюс некая константа, то больше нечему вызывать изменение реакции, а значит между заданным значением и измеряемым сигналом будет наблюдаться постоянная разница<sup>1</sup>.

Один из способов уменьшения отклонения пропорционального регулятора заключается в настройке его на высокое значение усиления. Для процессов с любой задержкой реакции максимальное усиление ограничено. Реакция пропорционального регулирования на любого рода ошибку происходит немедленно. Результатом слишком высокого усиления будет постоянное «перерегулирование» (завышенная реакция) регулятора и колебания регулируемой переменной. Степень этой «перерегулировки» может быть настолько высока, что регулятор будет постоянно полностью открывать и закрывать регулирующий клапан, действуя по существу как двухпозиционный регулятор. Это может привести к колебаниям регулируемой переменной вокруг необходимого заданного, однако количество колебаний вокруг заданного значения будет, как правило, выше приемлемого их числа, а постоянное срабатывание регулирующего клапана приведет к снижению срока его службы.

Регулирование переменных, изменяющихся очень быстро, возможно посредством пропорциональных контроллеров с высоким усилением. Одной из таких переменных является давление. Фактически регуляторы давления представляют собой регуляторы именно такого типа. Другой переменной, которая должна очень быстро реагировать на изменение выходного сигнала регулятора, является объемный расход, однако пропорциональные регуляторы с высоким усилением для регулирования расхода обычно не применяются.

Замеры расхода, как правило, искажаются значительными помехами, а регулятор будет реагировать на помехи так же, как и на действительное изменение сигнала о расходе, и это может привести к ошибкам в регулировании. Одним из способов снижения количества помех является фильтрование сигнала нормирующего преобразо-

<sup>1</sup>Применение  $P$ -регулятора ограничено при значительных возмущающих воздействиях и при значениях  $\frac{\tau_{зап}}{T_n}$ , близких к единице. — Прим. науч. ред.

вателя, а это приведет к такой же задержке реакции. Поэтому пропорциональное регулирование с высоким усилением и в этом случае не применяется.

### 16.5.3 Интегральное регулирование

Чтобы устранять статическую ошибку пропорционального регулятора, необходимо регулировать константу, прибавляемую к результату измерения каждого заданного значения. Функция *интегрального* (или *возвратного*) *воздействия* состоит именно в этом — в дополнение к немедленному воздействию пропорциональной части регулятора его сигнал настраивается в зависимости от накопленной ошибки.

В *пропорционально-интегральном (ПИ) регуляторе* для расчета выходного сигнала используется следующая формула:

$$O = G \left( E + \frac{1}{t_i} \int E dt \right), \quad (16.10)$$

где  $t_i$  — параметр настройки времени возврата или времени изодрома.

Время возврата — это время на повторение, причем зачастую это минуты. В некоторых регуляторах применяется обратное выражение, то есть единицы повтора на единицу времени. Важно знать, что именно интегрируется, поскольку оба этих способа оказывают противоположное воздействие на реакцию регулятора, сходное с различиями между усилением и зоной регулирования (*PB*).

Поскольку многие регуляторы работают с дискретным временем между каждым «шагом» расчета, то выходной сигнал *ПИ*-регулятора может быть рассчитан следующим образом:

$$O = G \left( E + \frac{1}{t_i} \sum (E \Delta t) \right). \quad (16.11)$$

Время возврата  $t_i$  в приведенных выше уравнениях при заданной погрешности представляет собой время, необходимое интегральному воздействию для осуществления изменения выходного сигнала, равного тому, которое обеспечивается в режиме пропорционального регулирования. Так, при  $t_i = 1$  мин, если изменение меняет значение с 0 на 1, то по пропорциональной части уравнения выходной сигнал будет мгновенно приобретать амплитуду  $G$ . Если погрешность (изменение) остается постоянной, то по прошествии 1 мин выходной сигнал приобретет вид амплитуды  $2G$ , где одно  $G$  обеспечивается пропорциональным компонентом, а второе  $G$  является результатом накопления погрешности за время, превышающее 1 мин. По прошествии второй минуты к амплитуде выходного сигнала регулятора добавится еще одно  $G$  (от интегрального компонента). Так будет продолжаться до тех пор, пока или эта погрешность не исчезнет, или регулятор не достигнет «предела насыщения», равного 0 или 100% выходного сигнала (рис. 16.6).

Насыщение как результат интегрального воздействия называют «завершением возврата». Завершение возврата может стать причиной медленной реакции регулятора, поскольку накопленная ошибка (погрешность) для устранения интегральной



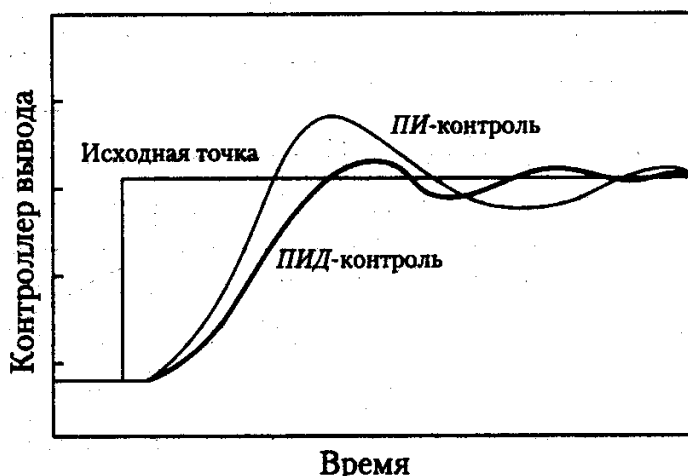


Рис. 16.7. Режим пропорционально-интегрального регулирования и регулирования по производной (ПИД-регулирование)

Погрешность  $E_d$  затем используется в алгоритме пропорционально-интегрального регулирования (ПИ) (уравнение 16.10) для обеспечения возможности осуществления пропорционально-интегрального регулирования по производной (ПИД).

Регулирование по производной очень полезно для систем, в которых встречаются большие отклонения от заданного значения или значительные задержки. Одним из распространенных примеров значительных отклонений от заданных значений может являться запуск периодических или непрерывных технологических систем переработки пищевых продуктов.

При запуске отклонение от заданного значения зачастую является очень большим, и это может стать причиной довольно быстрого «насыщения» регулятора. Без учета производной погрешность на протяжении некоторого времени меняла бы знак, чтобы «развернуть» интегральную часть алгоритма управления, а это может привести к значительному выходу за пределы заданного значения. Результатом этого может стать повреждение теплообменников и/или плохое качество продукции.

Вид кривых ПИД-регулирования и регулирования по производной приведен на рис. 16.7. По мере сокращения или устранения «перерегулирования» регулирование по производной также увеличивает время, необходимое технологическому процессу для достижения заданного значения.

Для систем с очень быстрой реакцией регулирование по производной не используется. В этих случаях такой способ регулирования не только не нужен, но может оказаться вредным. Регулировать по производной переменные с шумовыми сигналами также довольно трудно, поскольку алгоритм по производной будет реагировать как на погрешность, создаваемую помехами, так и на действительные отклонения переменной от заданного значения. Избежать этого в данном случае можно за счет правильного монтажа датчиков и с помощью фильтрации сигналов. Это поможет снизить уровень помех и увеличить возможности регулятора.

### 16.5.5 Комбинированные режимы регулирования

В представленных до сих пор уравнениях для ПИД-регулирования каждый режим зависит от коэффициента усиления пропорционального регулятора  $G$ . В некоторых



Таблица 16.2. Использование параметров ПИД-регулирования

Управляемая переменная	Пропорциональное	Интегральное	По производной
Температура	Средняя – высокая	Низкая – средняя	Низкая – средняя
Поток	Средний – высокий	Средний – высокий	Нет – низкая
Давление	Высокое	Среднее – высокое	Нет – низкое
Уровень	Низкий – высокий	Нет	Нет – низкий

ПИД: *П* – пропорциональный, *И* – интегральный, *Д* – по производной (от англ. *derivative*).

регуляторах для каждого из режимов предусмотрен алгоритм управления с независимыми коэффициентами передачи, которые обеспечивают независимую обработку результатов конкретного режима. В некоторых ситуациях это может оказаться полезным, однако одновременно может вызвать путаницу, если предполагается использование уравнения зависимых коэффициентов передачи. Возможно также возникновение сложностей ввиду необходимости учета большего количества параметров.

Режимы ПИД-регулирования могут быть использованы в самых разных сочетаниях. В табл. 16.2 представлены типовые сочетания для некоторых наиболее часто регулируемых переменных — возможно даже сочетание двухпозиционного регулирования с управлением по производной, что позволит свести к минимуму «перерегулирование» с помощью использования простого «комбинированного» алгоритма управления.

Двухпозиционное и ПИД-регулирование являются не единственными режимами регулирования, но именно они получили наиболее широкое распространение. В решении различных проблем управления могут пригодиться их расширения и усовершенствования. Некоторые из таких усовершенствований используются в качестве контрольных регуляторов, обеспечивающих уставки для стандартных пропорционально-интегральных регуляторов.

В системах регулирования широкое распространение получили два основных подхода, базирующихся на понятиях нечеткой логики и нейронных сетей. Такие подходы способны обеспечить регулирование, основанное на опыте работы с определенной системой или ее знании без использования при этом жестких моделей.

У этих подходов (и других, еще более изощренных) имеются некоторые преимущества, одно из которых — последствия неожиданных реакций могут быть обработаны стандартными регуляторами, снижая нагрузку на систему регулирования. Другим преимуществом является то, что в случае наличия проблем в контролирующей системе процесс регулирования может некоторое время осуществляться в стандартном режиме.

## 16.6 Настройка регулятора

ПИД-регулятор — инструмент очень полезный, однако для достижения нужного результата необходима его правильная настройка. Тип нужной его реакции разнится в

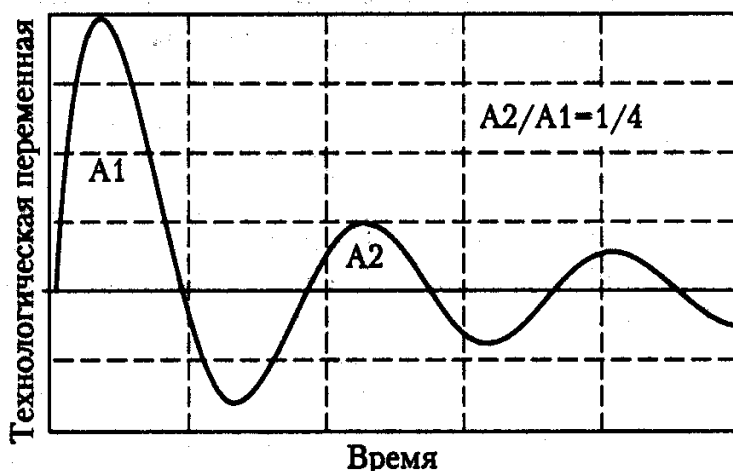


Рис. 16.8. Четвертное затухание

зависимости от варианта применения — в некоторых вариантах возможно преобладание необходимости как можно быстрее достичь заданного значения, тогда как основной задачей при других вариантах может являться сведение к минимуму «недорегулирования» или «перерегулирования». Иногда возникает необходимость в сочетании нескольких характеристик, а значит следует либо идти на компромисс, позволяющий получить что-то от каждой характеристики, либо внести в регулирующий контур изменения, соответствующие тем или иным обстоятельствам.

Даже в том случае, если регулятор настроен, не следует ожидать одинаковой реакции по всему диапазону значений регулируемой переменной. Например, коэффициент усиления контура нагрева при высоком расходе может быть относительно низким. При снижении расхода количество открытий клапана на каждый градус изменения температуры продукта будет меньше, и поэтому усиление в этом контуре будет выше. Эта повышенная реакция может стать причиной плохой или даже неустойчивой реакции на управляющее воздействие.

Реакция некоторых компонентов контура управления нелинейна, и поэтому коэффициент усиления контура на этих участках будет меняться. У регулирующих клапанов могут быть самые разные реакции (см. рис. 16.2). Если размеры регулирующего клапана существенно завышены, то верхний диапазон регулируемой переменной может быть достигнут за счет незначительного открытия клапана. Процесс регулирования при этом осложняется, поскольку значительная часть реакции на управляющее воздействие становится бесполезной.

Одним из распространенных типов реакции на управляющее воздействие является реакция четвертного затухания, впервые описанная в литературе в 1942 г. Циглером и Николсом [10]. Четвертное затухание означает уменьшение на четверть для каждого последующего отклонения на стороне заданного значения участка под характеристической кривой (рис. 16.8). Этот тип реакции предназначен для обеспечения ускоренной реакции при одновременном сохранении незначительной суммарной погрешности.

С другой стороны, эта реакция может быть не оптимальной, особенно в том случае, если не допускается пере- или недорегулирование. Иные возможности настройки, а также более подробное изложение методов ее осуществления приводится в соответствующей литературе [см., например, 5–7].

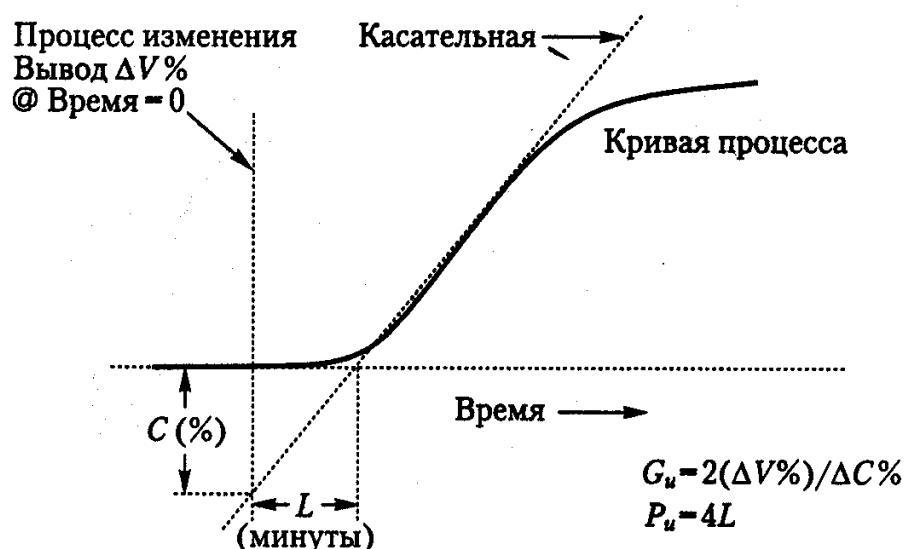


Рис. 16.9. Регулировка разомкнутого контура по Циглеру–Николсу

Двумя наиболее распространенными методами настройки являются регулировка *разомкнутого* и *замкнутого* контуров [10]. В зависимости от обстоятельств каждый из методов имеет свои преимущества.

Настройка разомкнутого контура осуществляется за счет перевода контура в ручной режим и изменения выходного сигнала. Как правило, изменение осуществляется в пределах 5–10%. График изменения управляющей переменной в зависимости от времени выстраивается, начиная с момента изменения выходного сигнала. Графический анализ данного метода, служащий для определения параметров, подставляемых в уравнения для различных режимов работы регулятора в зависимости от используемых режимов (см. табл. 16.3) приводится на рис. 16.9.

Использование метода разомкнутого контура достаточно сложно в контурах с малым временем реакции — например, в контурах регулирования давления или расхода. Времени запаздывания в этом случае почти нет, если только при регистрации характеристической кривой не будут предприняты значительные усилия. Тот факт, что при проведении теста контур уже не находится в автоматическом режиме, означает, что в ходе испытания необходимо быть особенно внимательным, чтобы не создать проблему, которая способна отразиться на качестве или безопасности.

При использовании методов настройки по замкнутому контуру регулятор работает в автоматическом режиме. Все режимы регулирования (кроме пропорционального) заблокированы. Пропорциональное воздействие увеличивается до тех пор, пока не возникнут длительные равные колебания амплитуды (рис. 16.10). Усиление, необходимое для получения длительных колебаний, называется полным усилением  $G_u$ , а время, затрачиваемое на один цикл контура, — полным промежутком времени  $P_u$ . Значения  $G_u$  и  $P_u$  используются в уравнениях для расчета параметров режима регулирования (табл. 16.3).

Поскольку реакция регулятора в диапазоне регулирования может быть различной, то и оптимальные параметры настройки бывают разными. Задачей процесса настройки является получение оптимальной реакции в нормальном рабочем диапазоне при одновременном достижении приемлемой реакции на других участках. Что-

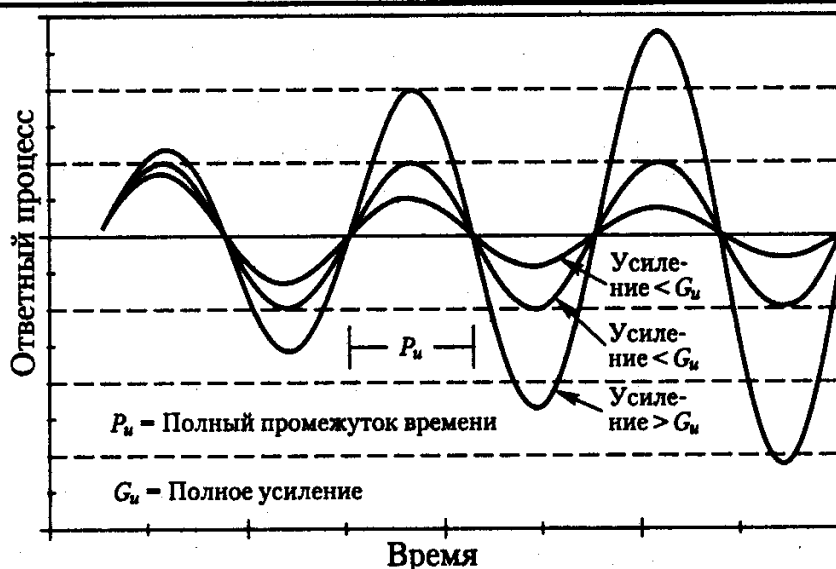


Рис. 16.10. Настройка замкнутого контура

бы добиться хорошего срабатывания контура регулирования, зачастую необходимо иметь достаточный опыт и терпение. Справиться с проблемами, возникающими в некоторых контурах, помогает применение более сложных методов регулирования, однако с учетом технологии и простоты обслуживания рекомендуется использовать как можно более простые контуры управления.

### 16.6.1 Автоматическая настройка

В последнее время широкое распространение получили самонастраивающиеся регуляторы. Самонастройка может оказать большую помощь при запуске и в ходе длительных технологических операций, но ее не следует считать панацеей. Чтобы иметь возможность воспользоваться преимуществами упомянутых регуляторов и их способностью к самонастройке, необходимо понять и правильно использовать режимы их срабатывания.

Двумя основными видами самонастраивающихся регуляторов являются детерминированные и стохастические [7]. Детерминированный самонастраивающийся регулятор вызывает изменения заданного значения, которые производят возмущения в контуре регулирования. Реакция на такое возмущение используется для расчета новых параметров настройки, и оператор может настраивать величину и частоту изменений заданного значения.

Стохастический самонастраивающийся регулятор не вызывает возмущений в контуре регулирования. Такой регулятор использует обычные возмущения, происходящие в ходе технологического процесса, для определения оптимальных настроечных констант, которые и следует использовать. Оператор имеет возможность настраивать как частоту проверки контура регулирования, так и экспоненциальный коэффициент «забывания», который определяет, насколько недавние помехи задают настройки регулятора.

Алгоритмы самонастройки особенно полезны в процессе ввода в эксплуатацию новых контуров регулирования, но для этого необходимо, чтобы имеющиеся помехи были сходны с теми, которые встречаются в обычном технологическом процессе.

Таблица 16.3. Расчет параметров настройки

Режимы регулятора	Управляющий параметр
Пропорциональный	$G = 0,5G_u$
Пропорциональный	$G = 0,45G_u$
Интегральный	$t_i = P_u/1,2$
Пропорциональный <sup>a</sup>	$G = 0,71G_u$
По производной	$t_d = P_u \cdot 0,15$
Пропорциональный +	$G = 0,6G_u$
Интегральный +	$t_i = P_u/2$
По производной	$t_d = P_u/8$

<sup>a</sup> см. [8].

По [10].

Использование свойства самонастройки для сравнения имеющихся на настоящий момент регулировок с предлагаемыми новыми способно оказать существенную помощь в диагностике проблем, возникающих в контурах регулирования.

Непрерывное использование самонастраивающихся регуляторов вызывает свои проблемы. Постоянные возмущения, вызываемые детерминированным самонастраивающимся регулятором, могут привести к нежелательным колебаниям регулируемой переменной. Если контур регулирования на протяжении длительного времени продолжает работать в одинаковых условиях, то регулятор будет стремиться к тому, чтобы оптимизировать срабатывание контура именно в этих условиях, и работа с возможным последующим резким изменением нагрузки будет затруднена из-за оптимизации при предыдущей нагрузке.

Для обеспечения оптимального срабатывания во всем диапазоне эксплуатационных условий используется, как правило, некоторый набор усредненных настроечных параметров. Часто появляется возможность загрузки настроечных параметров в условиях различных дискретных нагрузок. Процессы запуска, остановки и перехода на производство другой продукции влекут некоторые изменения нагрузки, что может стать причиной возникновения сложностей в использовании алгоритмов самонастройки. При использовании самонастраивающихся регуляторов избежать некоторых неожиданных результатов может применение внешнего контроля и возврат контуров в ручной режим тогда, когда они не используются, — например, при остановке технологического процесса.

## 16.6.2 Выявление неисправностей в контуре регулирования

Очень часто в случаях плохой работы контура регулирования первой реакцией является желание устранить возникшую проблему за счет регулировки настроечных параметров. Регулировка настройки нормально работавшего прежде контура может привести к улучшению его работы, но чаще всего она лишь устраняет симптом, не устраняя причины его возникновения.

Прежде чем изменить настройку контура, начавшего работать плохо, необходимо провести системный анализ каждого из его компонентов. Схема 16.1 представляет

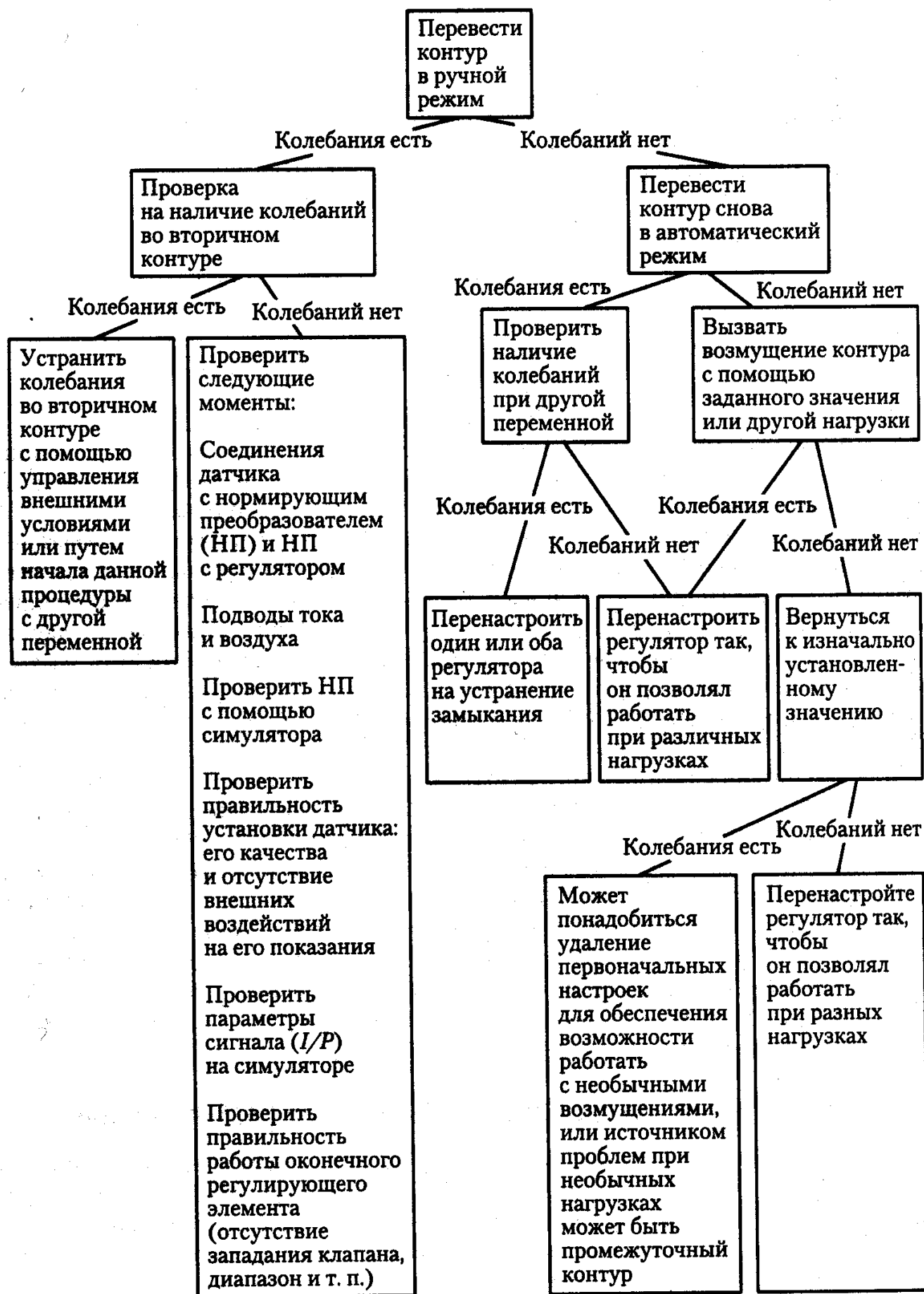


Схема 16.1. Выявление неисправностей в контуре регулирования

собой своего рода руководство по выявлению возможных неисправностей. Ниже мы более подробно раскрываем некоторые ключевые вопросы выявления и устранения неисправностей, причем выявление неисправностей должно осуществляться только персоналом, знающим правила техники безопасности.

Если возникшая проблема не исчезает после перевода контура в ручной режим, то фактической причиной ее возникновения может быть какая-либо другая, вторичная переменная. Постарайтесь проверить, нет ли какой-либо другой переменной, которая могла бы воздействовать на регулируемую величину и которая осциллировала бы подобным же образом. Например, колебания в контуре измерения температуры могут быть вызваны колебаниями расхода продукта или колебанием параметров какого-либо инвентаря. Если нужная переменная взаимодействует с некоторой вторичной переменной, то перед тем, как вернуться к настройке первой, необходимо устранить влияние вторичной.

Процедуру устранения колебания вторичной переменной можно начать с работы именно с этой переменной. В случае колебания какого-то инвентаря может потребоваться *управление внешними условиями*, например, с использованием какого-либо регулятора. Если возможности управления этой вызывающей возмущение переменной нет, то нужной переменной придется выдерживать эти колебания, либо же для преодоления возмущающих эффектов ей придется настраиваться быстрее.

Более быстрая настройка подразумевает увеличение усиления (уменьшение зоны пропорционального регулирования) и снижение времени возврата (повторов в минуту). При таком подходе следует быть очень внимательным, так как внутри контура возможно возникновение неустойчивости. Следует помнить и о том, что срабатывание контура с изменением нагрузки в большинстве случаев будет меняться.

Если проблема остается нерешенной после исключения других системных переменных, явившихся причиной возникновения колебаний, то следующий шаг должен состоять в том, чтобы убедиться в правильности приема сигнала от датчика. Необходимо проверить, вызывает ли отключение этого датчика аварийные сигналы, блокировку, и не ведет ли оно к возникновению опасных ситуаций.

Следует проверить соединение датчика с нормирующим преобразователем и правильность контакта с клеммами и шиной. Если все соединения датчика окажутся в порядке, то одной из возможностей проверки его исправности является использование симулятора. Даже если при подключенном симуляторе колебания исчезнут, а при повторном подключении датчика появятся вновь, сохраняется возможность того, что нарушения вызваны влиянием какой-либо технологической переменной или проблемами монтажа.

Ниже мы приводим некоторые технологические примеры, могущие стать причиной ошибок в считывании регулируемых переменных. Так, низкий расход хладагента в пластинчатом теплообменнике станет причиной неравномерного охлаждения и неоднородной температуры продукта (именно поэтому в разработке контура охлаждения следует использовать *принцип подачи и травливания*, как показано на рис. 16.12). К температурным колебаниям приводят и недостаточное время смешивания или же плохое смешивание после впрыска пара. На значения расхода или давления могут оказать влияние возмущения, вызванные сменой диаметра трубопровода или направления потока, а причиной пульсации потока может стать смещение положения насоса.

Некоторые из названных нарушений могут быть устранены благодаря правильной разработке системы и монтажу датчиков, и поэтому необходимо сверять фактический монтаж датчиков с рекомендациями производителя. Альтернативное средство для устранения некоторых колебаний — это фильтрование сигналов. Для многих нормирующих преобразователей фильтрование является стандартной характеристикой. Фильтр выполняет функцию усредняющего формирователя сигналов. Фильтрование способно сократить помехи, но одновременно оно увеличивает задержку реакции управляющего контура. Быстродействующему управляющему контуру для компенсации добавленной фильтром задержки может потребоваться некоторая «расстройка».

## 16.7 Методы регулирования

Существует множество различных возможных комбинаций элементов регулирования. Эти различные комбинации носят названия методов регулирования. Некоторые из таких методов мы рассмотрим ниже.

### 16.7.1 Обозначения процессов и измерительных приборов на чертежах

Отображение схем управления, как правило, осуществляется с помощью функциональных схем (ФС). На чертежах представляется связь датчиков с технологическим оборудованием и соединения между различными управляющими элементами. ФС используется для разработки и монтажа схем управления и выявления в них неисправностей, и схемы (чертежи) могут быть более или менее подробными.

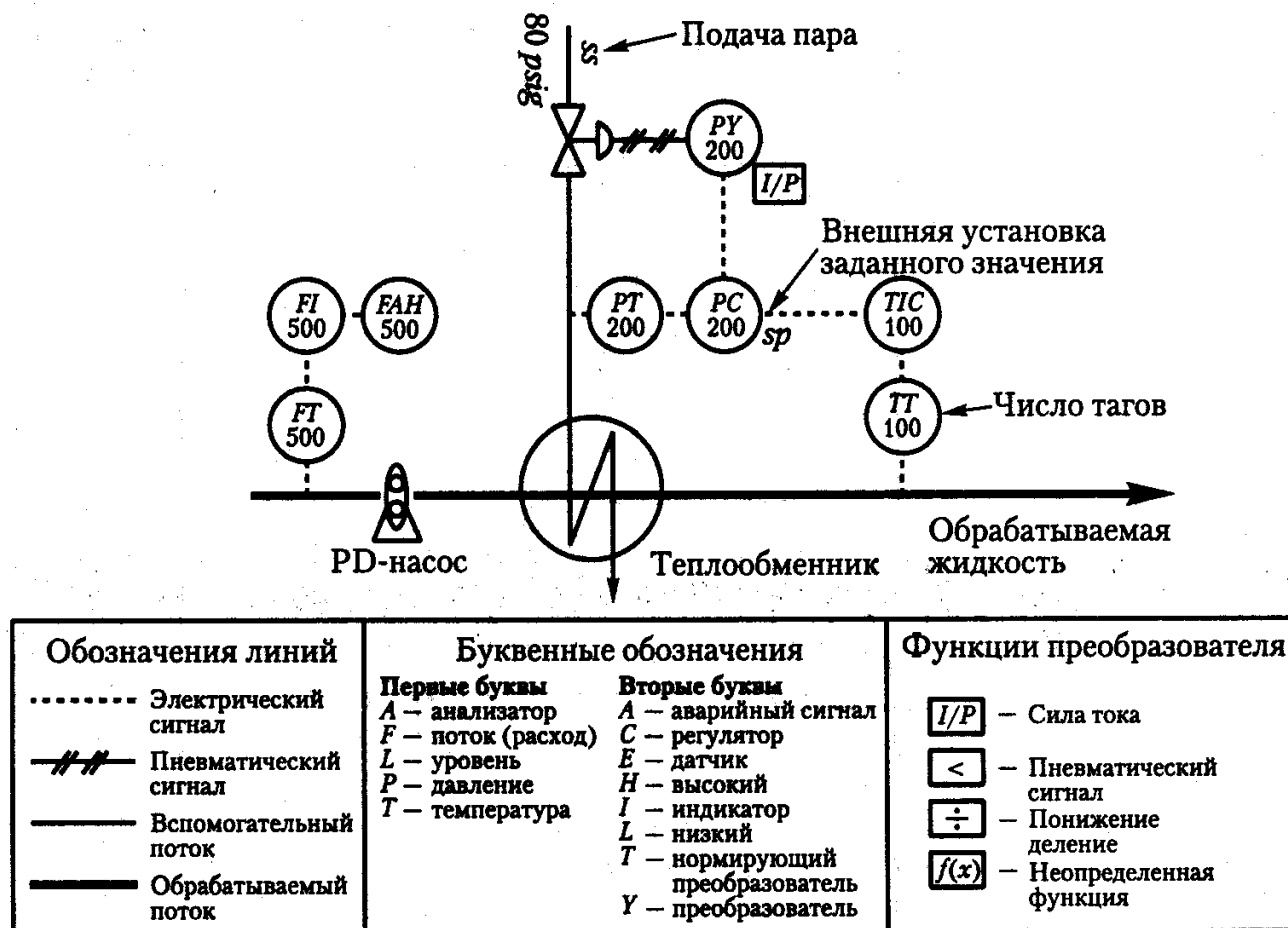
На рис. 16.11 представлена простая ФС с объяснением используемых в данном тексте символов. Стандарт *на символы и обозначения контрольно-измерительных приборов* (ANSI/ISA-S5.1-1984) включает широкий список обозначений. Чтобы упростить понимание конструкции и донести ее до множества разработчиков какого-либо технологического процесса, этот источник должен играть первостепенную роль при разработке технической документации<sup>1</sup>.

### 16.7.2 Регулирование с отрицательной обратной связью

Регулирование с отрицательной обратной связью является наиболее распространенным методом регулирования. Происхождение этого термина обязано тому, что регулируемая переменная замеряется (обрабатывается) после воздействия на нее регулирующего элемента. Это не означает, что датчик регулируемой переменной всегда находится за регулирующим элементом — правильнее было бы сказать, что обратная связь имеет отношение к потоку информации в петле обратной связи (рис. 16.11).

<sup>1</sup> В РФ построение функциональных схем выполняется по ГОСТу 21404-85. — Прим. науч. ред.





**Рис. 16.11.** Пример схемы технологического процесса и принятых обозначений КИПиА

Информация обратной связи используется регулятором для ослабления воздействий помех и возврата регулируемой переменной к заданному значению.

Слово «отрицательный» относится к смене знака, которую информация должна осуществить внутри контура, чтобы свести отклонение к нулевому значению. На рис. 16.12 представлено схематическое отображение трех контуров с отрицательной обратной связью.

Регулирование с обратной связью может быть обратным или прямым. Обратное регулирование имеет отношение к направлению управляющего воздействия. Большинство контуров регулирования с обратной связью будут действовать в направлении, обратном погрешности. Например, в изображенном на рис. 16.12 контуре нагрева в случае положительной погрешности (то есть при фактической температуре выше заданного значения) реакция будет отрицательной (то есть клапан закрыт), снижая количество подаваемого пара.

Контур регулирования температуры нагрева, изображенный на рис. 16.12, будет контуром прямого регулирования, если клапан открыт. Чтобы закрыть клапан, регулятору придется повысить выходной сигнал. В то время, как весь контур остается возвратным, действие регулятора придется реверсировать, поскольку оказалось переключено срабатывание клапана.

Регулирование процесса охлаждения на рис. 16.12 представляет собой пример прямого регулирования. Если температура превышает заданное значение, результатом чего

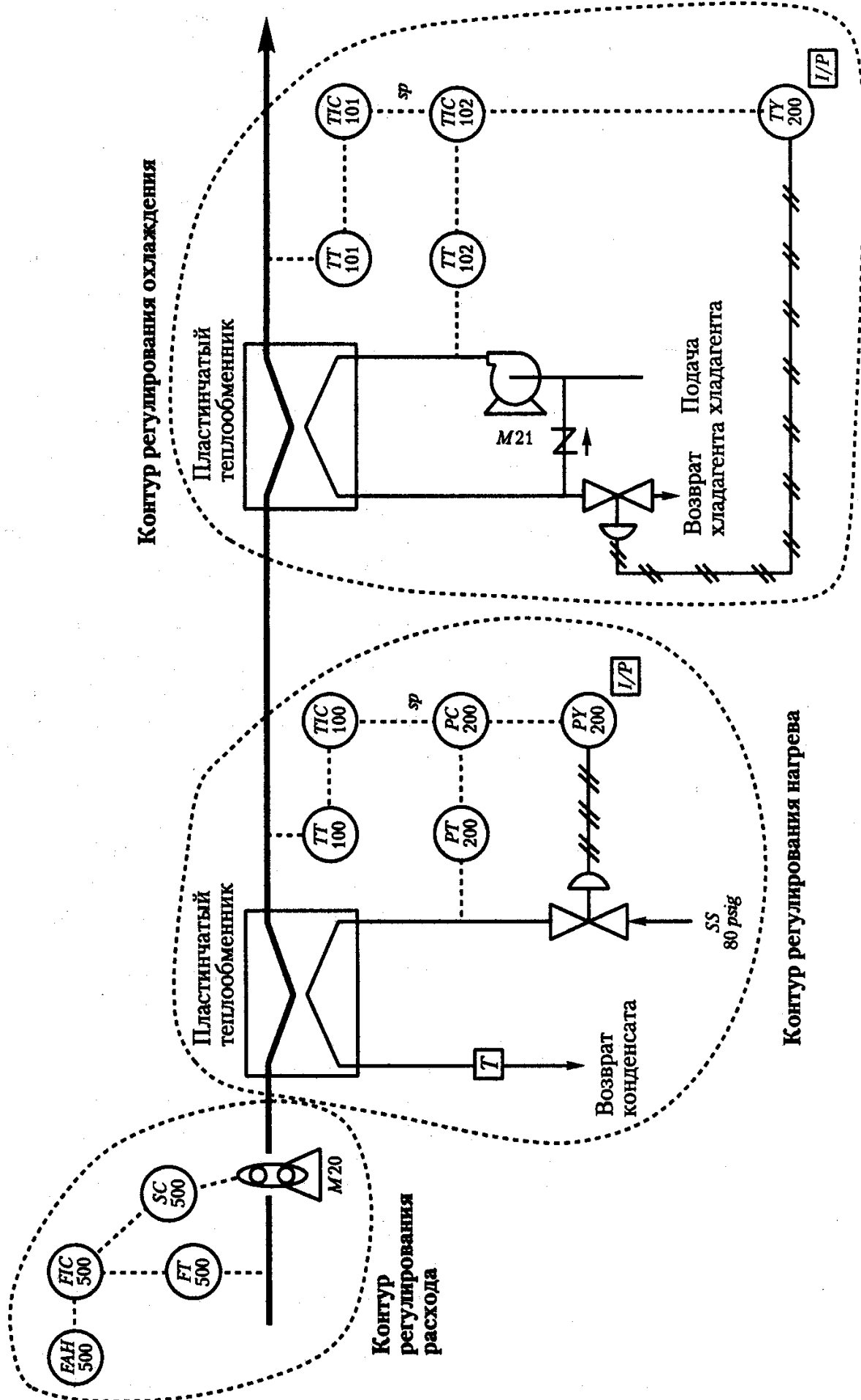


Рис. 16.12. Примеры контуров регулирования

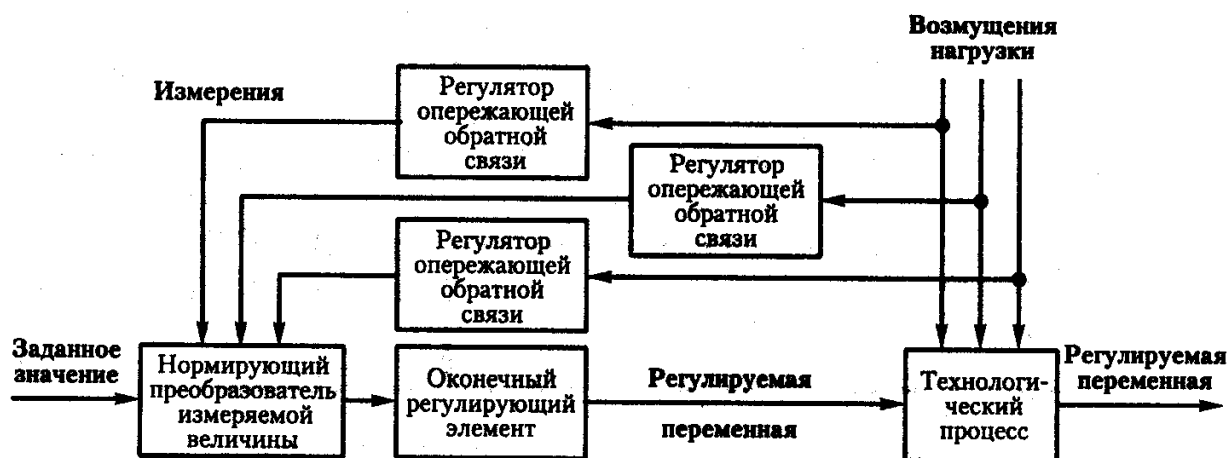


Рис. 16.13. Модель регулирования с опережающей обратной связью

становится положительная погрешность, то и реакция также окажется положительной, то есть произойдет открытие клапана, позволяющее увеличить поток хладагента. Условием для определения регулятора как регулятора прямого или обратного действия является учет направления действия каждого из элементов регулирования. Большинство регуляторов предоставляют возможность переключения этих двух режимов.

Простота реализации регулирования с обратной связью объясняет широту его применения. Недостатком этого метода можно считать то, что регулятор всегда реагирует на события, которые уже произошли. Датчик замеряет воздействия любого нарушения, а затем уже реагирует. В контурах регулирования со значительными задержками или временем запаздывания использование этого вида регулирования может оказаться неэффективным из-за невозможности реагировать на значительные возмущения.

Регулирование с обратной связью по своей природе носит колебательный характер. Причиной неустойчивости может стать неверная настройка усиления регулятора. Нелинейность компонентов контура регулирования приводит к неверной реакции во всем диапазоне регулирования.

В контурах регулирования с обратной связью часто случается задержка между моментом осуществления коррекции и моментом измерения воздействия проведенной коррекции, что может привести к отклонению от заданного значения или к неверному управлению из-за постоянного «перерегулирования».

Несмотря на некоторые свои недостатки, регулирование с обратной связью зачастую является основой для разработки системы регулирования. Преодолеть имеющиеся недостатки, одновременно сохраняя простоту понимания и обслуживания системы, помогает сочетание метода регулирования с обратной связью с другими методами регулирования.

### 16.7.3 Регулирование с опережающей обратной связью

При регулировании с опережающей обратной связью замеряются помехи, и регулирующий элемент настраивается еще до проявления искажающего воздействия. Та-



но этих дополнительных параметров, а необходимость в дальнейшем измерении расхода горячей воды отпадает.

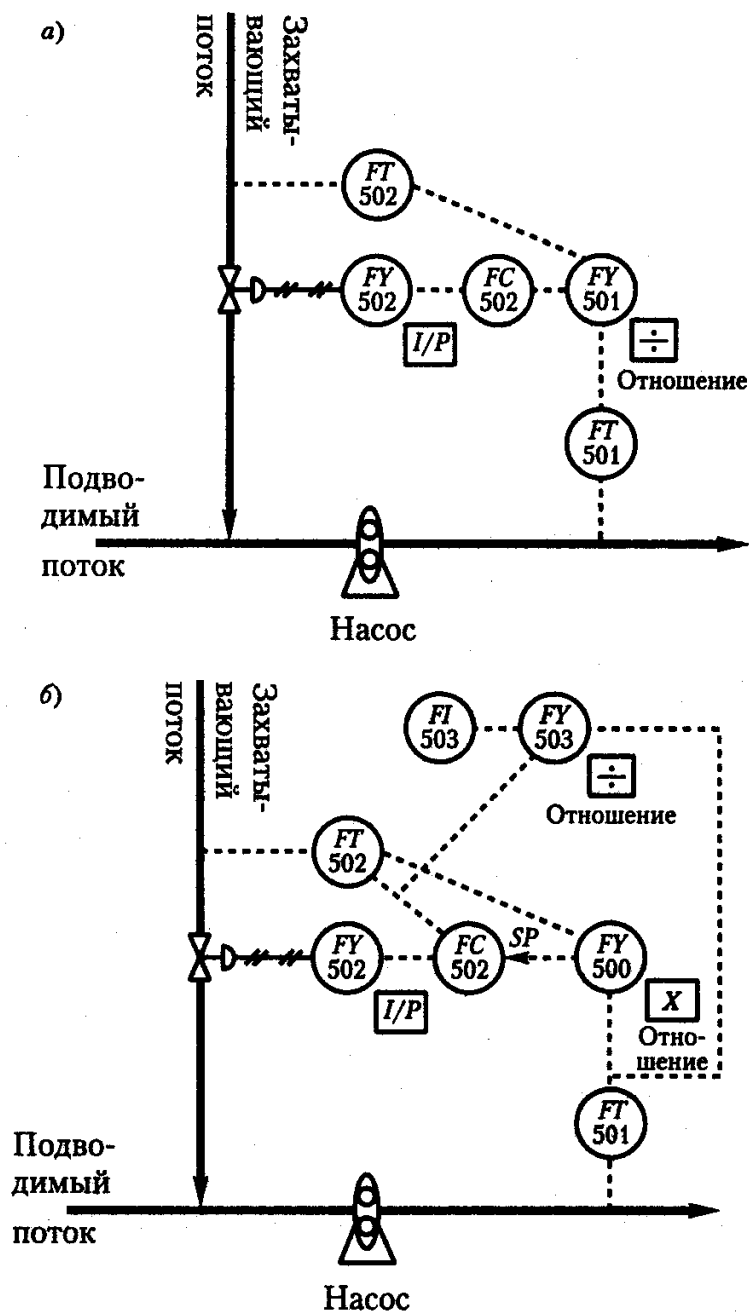
Регулирование с опережающей обратной связью способно очень быстро устранить воздействия помех, однако расплачиваться за возможность обеспечения регулирования приходится вводом дополнительных компонентов и зависимостью от какой-либо модели. Даже в простом примере регулирования температуры воды не принимаются во внимание возмущения, возникающие из-за меняющихся теплопотерь в трубопроводах. Всеобъемлющая модель может быть очень сложной, но при этом не учитывающей непредвиденные возмущения. Приходится выбирать между более совершенным регулированием и увеличением стоимости и сложности.

Недостатком большинства вариантов регулирования с опережающей обратной связью является недостаток перекрестного контроля результата управляющего воздействия и его сравнения с регулируемой переменной. Помочь преодолеть эту проблему, а также некоторые из проблем, связанные со сложностью использования исключительно регулирования с опережающей обратной связью, может сочетание регулирования с опережающей и регулирования с обычной обратной связью. Так, в примере регулирования температуры смешиваемой воды при поддержании температур холодной и горячей воды относительно постоянными, расход холодной воды становится единственным параметром, вводимым в модель, а значит эта модель просто устанавливает соотношение расходов. В этом случае температурный контур с обычной обратной связью может быть использован для регулировки выходного сигнала данной модели для компенсации неучтенных возмущений. Выходной сигнал контура регулирования температуры можно отрегулировать таким образом, чтобы он, действуя в качестве подстройки, составил плюс или минус процент от общих выходных данных. Чтобы рассчитать подстройку температурного контура в  $\pm 25\%$  от сигнала расхода, составляющего от 0 до 100%, необходимо разделить выходной сигнал температурного регулятора на два и от полученного результата вычесть 25%. Это вычисление и добавление подстройки к выходному сигналу данной модели представлены на рис. 16.14, 6 кружками *TY-103* и *FY-503* соответственно.

## 16.7.4 Регулирование по соотношению

Регулирование по соотношению представляет собой наиболее простую форму регулирования с опережающей обратной связью. Наиболее широкое применение получил такой вариант регулирования по соотношению, как смешивание различных подаваемых потоков. Модель данного регулирования очень проста потому, что общий поток должен быть равен сумме его частей. Одна из сложностей данного варианта состоит в необходимости наличия отношения по массе при измерении объемного расхода. В этом случае колебания плотностей не учитываются.

На рис. 16.15 отображены два различных метода настройки регулирования по соотношению. На рис. 16.15, а показан метод по рассчитанному соотношению. В этом случае рассчитывается некоторое соотношение расходов, которое затем подается на регулятор в качестве измеренного значения. Заданное значение регулятора — это желаемое соотношение. Регулятор регулирует расход захватывающего потока, в то время как другой подводимый поток в этой части схемы не регулируется.



**Рис. 16.15** Два метода регулирования по соотношению:  
 а) по уже рассчитанному соотношению; б) по рассчитанному расходу

Регулирование по рассчитанному соотношению обладает тем преимуществом, что это соотношение — заданное значение регулятора и рассчитывается самим регулятором. Таким образом, оно становится доступно оператору как некая часть регулятора.

Недостатком же метода регулирования по рассчитанному соотношению является то, что усиление регулятора будет меняться параллельно изменению расхода подводимого потока. Коэффициент усиления замкнутого контура представляет собой соотношение изменения выходного сигнала и соответствующего изменения регулируемой переменной. Регулируемая же переменная является соотношением захватывающего потока и подводимого. По мере увеличения подводимого потока такое же изменение выходного сигнала и, следовательно, изменение захватывающего потока

будет на соответствующую долю меньше воздействовать на данное соотношение. Таким образом, увеличение подводимого потока снижает коэффициент усиления контура. Это может стать причиной неустойчивости в различных частях рабочего диапазона данного контура.

Другой метод регулирования по соотношению называют методом рассчитанного расхода. При использовании этого варианта подводимый поток умножается на данное соотношение, что позволяет рассчитать задаваемое значение для регулятора обратной связи захватывающего потока (рис. 16.15, б).

В этом случае подводимый поток не оказывает воздействия на коэффициент усиления замкнутого контура, поскольку усиление является попросту соотношением изменения выходного сигнала регулятора и соответствующего изменения захватывающего потока. Недостатком данного метода является то, что без дополнительных элементов системы управления это соотношение не рассчитывается и не отображается, как видно из рис. 16.15, б (FY-503 и FI-503).

На рис. 16.15, а, б отображены клапаны, выступающие в качестве регулирующих элементов управления расходом жидкости. Колебания давлений перед и за элементом могут повлиять на коэффициент усиления этих контуров регулирования так же, как они будут влиять на общий расход при определенном открытии клапана. Использование приводов с регулируемой частотой вращения и поршневых насосов способно снизить воздействие изменения давлений в трубопроводе на коэффициент усиления контура регулирования. В тех случаях, когда в технологических процессах для обеспечения расхода применяются насосы, необходимо рассматривать возможность их использования в качестве элементов регулирования расхода.

Альтернативой схемам регулирования по соотношению, представленным на рисунке 16.15, а, б, является возможность использования поршневых насосов с изменяемой длиной хода поршня, подсоединенные к общему приводу. Когда соотношения различных компонентов окажутся заданными за счет регулировки длин хода поршня, отпадет необходимость дальнейших регулировок. Изменения в расходе основного потока осуществляются за счет изменения скорости главного привода, который таким же образом и в такой же степени регулирует скорости вспомогательных насосов. Поскольку изменения скорости не влияют на длину хода, то пропорции поддерживаются автоматически.

При работе с группами насосов измерений не требуется, что означает отсутствие подтверждений правильности дозирования. Для обеспечения определенного уровня надежности системы в нее должны включаться реле уровня и расхода.

### 16.7.5 Контроль внешних условий

Методы регулирования с обычной и упреждающей обратной связью существуют для того, чтобы реагировать на помехи и удерживать управляемую переменную как можно ближе к некоторому заданному значению. Метод контроля внешних условий позволяет устранять воздействие различного рода возмущений за счет их регулирования.

В ходе регулирования процесса нагрева (рис. 16.12) возможно возникновение множества помех, примером которых могут служить давление подвода пара и расход продукта. До некоторой степени обеспечить регулирование этих переменных позво-

ляет установка регулятора подвода пара и регулятора расхода. Если некоторые из возможных помех могут устранить подобные устройства, то другие — например, загрязнение теплообменника, температура и влажность в помещении по-прежнему будут воздействовать на процесс регулирования нагрева.

Соответствующее использование метода регулирования внешних условий способно в значительной степени улучшить работу других регулирующих контуров. Возмущающий параметр на практике невозможно удерживать постоянным. В контуре нагрева, если необходимо изменить расход продукта, чтобы он отвечал дальнейшим требованиям, заданное значение расхода должно быть ограничено так, чтобы нагреватель мог соответствовать этим изменениям.

## 16.7.6 Каскадное регулирование

Каскадное регулирование представляет собой метод, который может быть использован для улучшения срабатывания некоторых контуров регулирования, а также для преодоления некоторых возмущений внутри системы. Регулирование разделяется на две части, а именно, вторичный (внутренний) контур и первичный (внешний) контур. Выходной сигнал первичного контура используется в качестве заданного значения для вторичного контура.

Как контур нагрева, так и контур охлаждения, представленные на рис. 16.12, настраиваются в качестве контуров каскадного регулирования. В качестве первичного контура в контуре нагрева выступает *ТС-100*, а в качестве вторичного — регулятор давления пара *РС-200*. В контуре регулирования охлаждения *ТС-100* является первичным контуром, в то время как *ТС-102* регулирует температуру рециркулирующего хладагента и выступает в качестве вторичного контура.

Вторичный контур способен контролировать нарушения обрабатываемой переменной до того момента, как они смогут воздействовать на первичную переменную. При обеспечении регулируемой переменной обратной связью первичный контур регулирования может быть линейным в большей степени. Регулятор первичного контура настраивает заданное значение, которое связано с первичной переменной в большей степени, чем регулирующий элемент. В случае задержки во вторичном контуре регулирования скорость реакции первичной переменной может быть увеличена при помощи каскадного регулирования.

Скорость реакции вторичного контура должна быть быстрее, чем скорость реакции первичного контура — в противном случае первичный контур регулирования постоянно будет вносить изменения в заданные значения вторичного контура, не оставляя при этом достаточного времени для проявления воздействий подобных изменений. Результатом такого взаимодействия контуров становятся постоянные колебания внутри первичного контура. Необходимо обратить внимание на то, что трехкратное ускорение вторичного контура по отношению к первичному не означает умножение или деление параметров настройки первичного контура на три. Такое ускорение скорее подразумевает, что корректировка заданной погрешности за счет вторичного контура будет осуществляться в три раза быстрее, чем корректировка той же степени погрешности в первичном контуре. Постоянные настройки для обоих контуров, как правило, не будут иметь отношения друг к другу из-за различий в индивидуальных коэффициентах усиления контуров.



Если во вторичном контуре используется механизм позиционирования клапана, то существует двойной каскадный контур. Механизм позиционирования клапана может оказаться полезен тем, что поможет устранить гистерезис (запаздывание) клапана и сделать контур более линейным.

Зачастую существует возможность выбора переменных, используемых во вторичном контуре регулирования. Следует выбирать ту переменную, которая является наибольшей помехой для первичного контура и обладает наибольшей скоростью реакции. Типичными быстрыми контурами, применяемыми во вторичных контурах, являются давление, расход и положение клапана.

При настройке каскадных контуров первым необходимо настраивать вторичный или внутренний контур. Поскольку первичный регулятор постоянно предоставляет корректировку заданного значения для регулятора вторичного контура, то смещения вторичного регулятора допустимы. Допущение смещения означает, что отпадает необходимость в возвратном действии. Возвратное действие может быть нежелательным, поскольку оно потенциально может снизить скорость реакции контура регулирования.

### 16.7.7 Сигналы блокировки

*Блокировки* — это дискретные сигналы, которые вырабатываются в качестве ответной реакции на определенные условия, возникающие в ходе процесса. Блокировки часто используются для инициализации какого-то события или последовательности событий, которые предотвратили бы проявление небезопасного или другого нежелательного состояния технологического процесса. В качестве примера может быть приведено реле уровня внутри уравнительного резервуара, которое используется для сообщения системе о необходимости прекращения подачи продукта, предотвращая таким образом переполнение резервуара. В технологических установках, в которых обработка продукта осуществляется при высокой температуре на протяжении короткого времени (*HTST*), для предотвращения вовлечения не до конца обработанного продукта в дальнейший ход процесса и в конечном итоге — его попадания к потребителю, используются аварийные сигналы, сообщающие о максимальном расходе и низкой температуре.

Блокировки могут быть использованы и для перевода контуров регулирования в ручной режим, и для принудительного отключения. Эти действия могут выступать в качестве вторичного обеспечения безопасности в условиях бездействующего контура. Другим преимуществом установки выхода бездействующего контура на ноль является то, что при возврате в автоматический режим выходной сигнал регулятора должен будет иметь линейно нарастающую характеристику, что позволит снизить пики, способные повлиять на работу оборудования. Перевод контура из автоматического в ручной режим позволит запустить его без накопленного возвратного действия. В случае насыщения возвратного действия при бездействующем контуре управления последующее управляющее воздействие может оказаться замедлено (из-за накопленного возвратного действия).

В качестве источников выработки цифровых сигналов блокировки могут выступать различные источники. Общепринятыми источниками в этом случае являются



На рис. 16.16 приведена монтажная схема размещения регулирующего элемента в контуре нагрева, которая должна помочь предотвратить срабатывание низкотемпературной блокировки (TAL-100). Дополнительный регулирующий элемент имеет форму регулятора расхода, использующего в качестве входного сигнала выходной сигнал регулятора давления. Высокое значение выходного сигнала регулятора давления означает возникновение проблемы с подачей достаточного количества тепла. В этом случае за счет замедления интенсивности подачи регулятор позволит осуществлять поддержание температуры.

Если выходной сигнал регулятора давления (0–100% положения клапана) будет ниже заданного значения основного регулятора, то выходной сигнал этого ПИ-регулятора насыщается при 100%. Для выбора сигнала нижнего значения, подаваемого на регулятор скорости, используется соответствующий селектор.

В момент, когда входной сигнал основного регулятора превысит свое заданное значение, его выходной сигнал будет снижаться до тех пор, пока в конечном счете не окажется ниже сигнала регулятора расхода. После этого селектор выберет выходной сигнал основного регулятора, а не сигнал регулятора расхода. Расход будет уменьшаться до тех пор, пока выходной сигнал регулятора давления не окажется ниже заданного значения основного регулятора или пока не окажется достигнутым ниже предельное значение (фиксирование уровней).

При восстановлении системы основной регулятор поднимет заданное значение расхода до того, при котором регулятор расхода снова возьмет на себя процесс регулирования в соответствии с определением селектора. Параметр обратной связи для обоих регуляторов расхода следует конфигурировать таким образом, чтобы он представлял собой выходной сигнал после нижнего селектора, что обеспечивает плавные переходы между регуляторами.

Регуляторы замещения не являются средством замены блокировки, а предназначены больше для предотвращения ее активации.

## 16.8 Аппаратура регулирования

Аппаратура регулирования очень разнообразна. Цифровые технологии в значительной степени разнообразили имеющееся оборудование и расширили его возможности. Управляющее воздействие в основном осуществляется в трех типах оборудования, а именно *одноконтурном регуляторе (SLC), программируемом логическом контроллере (PLC) и системе распределенного управления (DCS)*. Благодаря развитию технологии и появления все большего количества вариантов в каждой из категорий оборудования границы между ними становятся все более расплывчатыми.

### 16.8.1 Одноконтурный регулятор

Одноконтурный регулятор, как это ясно уже из его названия, предназначен для одиночного контура управления. Типы и возможности таких регуляторов довольно обширны. Наравне с регуляторами младшей модели с единственным входом и выходом

и рудиментарным интерфейсом пользователя, служащим для регулировки уставки и параметра *ПВД*, существуют и регуляторы старшей модели с множественными контурами регулирования, со многими цифровыми входами и выходами, а также сложным интерфейсом пользователя.

Некоторые одноконтурные регуляторы обладают возможностями связи. Это позволяет использовать более сложные схемы регулирования, чем те, применение которых возможно с единственным блоком. Это дает возможность централизованного контроля и регулировки наравне с более сложным интерфейсом пользователя. Такая комбинация одноконтурного регулятора, объединенного в сеть с центральным устройством управления, по существу превращает одноконтурный регулятор в систему распределенного управления.

## 16.8.2 Система распределенного управления

Причиной возникновения распределенного управления является необходимость в более сложном централизованном конструировании, контроле и в увеличении возможностей пользовательского интерфейса с одновременным отсутствием зависимости от единственного мощного компьютера, предусмотренного для выполнения всех функций. При распределенном управлении функции и вычислительные возможности распределены между несколькими процессорами, что позволяет создать более мощную и одновременно относительно простую систему.

Как правило, для программирования и/или конфигурирования модулей, подключенных к рабочим органам, а также для обеспечения интерфейса оператора используется центральный пульт управления. В модулях рабочих органов смонтированы датчики и исполнительные элементы. Преобразование из аналоговой формы в цифровую, расчет алгоритма управления, а также преобразование из цифровой формы в аналоговую могут быть осуществлены в модуле рабочего органа.

Возможно подключение многочисленных модулей устройств к единственной центральной станции управления, а несколько станций управления могут быть объединены в единую систему управления. Модульный принцип позволяет этим системам соответствовать необходимому варианту их применения, не требуя при этом использования специальных систем, которые зависят от объема выполняемой работы.

Количество регулируемых одним модулем контуров управления может составлять от одного до нескольких десятков. При этом существуют и другие возможности — например, цифровое логическое регулирование. Производители систем распределенного управления стремятся к увеличению модульности путем уменьшения количества устройств, входящих в зону ответственности каждого из модулей, при одновременном увеличении числа вариантов и возможностей самодиагностики модулей.

Первоначально в системах распределенного управления производители использовали собственные аппаратные средства и программное обеспечение, что усложняло их связь с другими системами. Требования заказчиков, настаивающих на усовершенствовании способностей систем к их объединению в сети, заставляет поставщиков систем составлять программы на стандартных языках программирования, использовать привычные компьютерные комплексы и обеспечивать связь с применением стандартизированных протоколов.

### 16.8.3 Программируемые логические контроллеры

Программируемые логические контроллеры первоначально были разработаны в качестве программируемых устройств, которые заменили бы собой не отличавшиеся приспособляемостью и одновременно достаточно сложные коммутационные панели. Их изначальным предназначением было обеспечение управления очередностью операций, а также осуществление других видов дискретного управления. При этом математические и другие вычислительные возможности регуляторов оставались весьма ограниченными.

Развитие компьютеров настолько увеличило способности программируемых логических контроллеров (*PLC*), что сделало общепринятыми *ПИД*-регулирование и другие вычислительные возможности.

Несмотря на то что связь между различными компонентами *PLC*, как правило, осуществляется по собственной сети, сохраняется и возможность установления связи с другими протоколами и системами. Некоторые фирмы даже предоставляют возможность объединения персональных компьютеров и компьютеров, действующих на рабочих станциях, на объединительной плате программируемого логического контроллера.

Программируемые логические контроллеры обычно не поставлялись со стандартным интерфейсом оператора. В традиционном исполнении контроллера единственным необходимым интерфейсом были кнопки, а программирование осуществлялось за счет использования специализированных программирующих терминалов.

Распространение персональных компьютеров, а также других их разновидностей обеспечило появление платформы для использования интерфейса пользователя программируемого логического контроллера. Объединение персонального компьютера с усовершенствованными возможностями *PLC* способно обеспечить функциональность системы распределенного управления (*DCS*).

## 16.9 Экономика управления технологическим процессом

Зачастую бывает непросто принять решение, касающееся уровня автоматизации данного проекта. Тем не менее использование методов управления технологическим процессом может быть оправдано многими факторами. Ниже мы рассмотрим некоторые примеры.

Надлежащая разработка системы управления предполагает рассмотрение использования разнообразных технических устройств. Чрезмерное количество техники способно подействовать отвлекающе. Ключом к успешному вводу системы в эксплуатацию является ее простота. Продолжительная бесперебойная работа системы зависит от полезности выполняемых функций для оператора, а также от простоты обслуживания. Возможно, причудливая графика хороша для представления ее менеджменту, но на оператора она может действовать отвлекающе и оказаться обузой при обновлении системы. Сложные методы программирования способны удовлетворить программиста различного рода изящными решениями и сэкономить несколь-

ко байтов памяти, но одновременно они могут запутать персонал, занимающийся обслуживанием системы.

Наибольшая экономия средств потенциально заключена в области экономии живого труда. Автоматизация средств управления способна упростить работу оператора, что позволит уменьшить количество операторов, работающих на определенном технологическом участке. Тем не менее количество затрачиваемого труда зачастую бывает проще снизить за счет механизации, чем с помощью различных методов управления технологическим процессом. Хотя средства управления обеспечивают улучшение срабатывания, они в то же время не всегда устраняют необходимость запуска и остановки системы оператором, а также контроля за ней.

Непрерывность (согласованность) срабатывания может послужить экономическим обоснованием использования автоматизированных средств управления. Более согласованное срабатывание может означать снижение выпуска продукта, не соответствующего рецептуре, который пришлось бы отбраковывать, восстанавливать или продавать по заниженной цене.

Непрерывность работы может увеличить время эксплуатации установки благодаря уменьшению количества остановов, причиной которых является несоответствие продукта нормативной документации. Например, в ходе технологического процесса, включающего в себя фазу подавления нагрева, случаев понижения температуры ниже необходимой можно избежать за счет включения средств управления в регулировку переменных, воздействующих на температуру, — например, подачу пара и расход продукта. Уменьшение изменений в характеристике продукта позволяет добиться смещения в сторону более экономичных заданных значений. Снижение колебаний содержания влаги в выпеченном или высушенном продукте позволяет увеличить заданное значение влаги, не подвергая при этом опасности сохранность и качество продукции.

Непрерывность работы приводит, как правило, к общему улучшению качества производимого продукта. Качество продукта само по себе зачастую бывает непросто выразить количественно как экономическое обоснование. Несмотря на это, его достижение является важной задачей. Иногда экономичность, достигаемая за счет качества, очевидна — например, если продукт продается по сортам, то средства управления могут помочь добиться более экономичного разделения сортов.

### 16.9.1 Затраты на системы регулирования

Стоимость оборудования для системы регулирования (одноконтурные регуляторы, программируемые логические контроллеры, система распределенного управления) разительно отличается. Если речь идет о вводе в работу всего нескольких контуров, то одноконтурные регуляторы намного дешевле всего остального оборудования. Однако если возникает необходимость во многих контурах и расширенных функциональных возможностях системы, то это преимущество в цене исчезает. Возможности систем регулирования, а также их способность соответствовать индивидуальным нуждам конкретного проекта постоянно обновляются. Решение о том, какую из систем приобретать, в первую очередь зависит от требуемых характеристик, а также

от возможности ввода в эксплуатацию и обслуживания аппаратных средств и программного обеспечения.

Основную стоимость системы составляют, как правило, затраты на аппаратные средства. Развитие компьютеров способствовало снижению затрат при одновременном увеличении возможностей. Усовершенствование возможностей и снижение необходимых затрат позволили устанавливать все более комплексные системы. Все эти факторы привели к повышению затрат на программное обеспечение, которые могут быть примерно в пять раз выше затрат на аппаратные средства.

Обеспечение программистов подробным описанием технологического процесса значительно снизит число модификаций, необходимых при вводе системы в эксплуатацию и ее запуске. Использование структурированных методов программирования упростит процесс выявления неисправностей, а также снизит затраты на техническое обслуживание и внесение последующих изменений. Другой важной составляющей затрат на ввод системы регулирования в эксплуатацию является обучение персонала. Использование крупных систем может потребовать обучения операторов на полномасштабных симуляторах, что позволит обеспечить безопасную и экономически выгодную работу системы после ее инсталляции.

## 16.9.2 Составление сметы на контуры регулирования

Одним из вариантов примерного расчета стоимости оборудования управляющего контура может быть расчет процента от общих капитальных затрат. В 1968 г. Петерс и Тиммергаус для «обычного» проекта предложили коэффициент, составляющий от 2,5 до 7%, со средним значением равным 3%. «Обычным» может быть назван проект, в ходе которого большая часть капиталовложений ориентирована на обрабатывающее и упаковочное оборудование, здания и сооружения.

Проекты в значительной степени отличаются друг от друга в том, что касается регулирования технологического процесса. Проекты, где используется большое или очень малое количество регулирующей аппаратуры, проще рассчитывать, основываясь на фактических ценах поставщиков. Типовой контур регулирования после его монтажа может стоить от \$2000 до \$8000. Цена некоторых необычных датчиков — например, большого количества анализаторов (цвета, влажности, плотности) может быть во много раз выше цены обычно монтируемых измерительных приборов (температуры, давления и расхода).

Стоимость проектирования оборудования, используемого для регулирования технологического процесса, зачастую оценивается на основании количества входов и выходов. На каждый вход/выход (цифровой или аналоговый) часто применяется типовый расчет — 2 ч проектирования, а час проектирования может стоить от \$50 до \$100 (в зависимости от фирмы и необходимой детализации проекта).

## 16.10 Разработка системы регулирования

Наиболее важным фактором, принимаемым во внимание в ходе разработки системы регулирования, являются знания о том технологическом процессе, который предпо-

лагается регулировать. Также необходимо иметь представление о причинно-следственных связях между характеристиками продукта и регулируемыми параметрами процесса. Пределы и точность, требуемые от каждого регулируемого параметра, будут определять тот тип регулирования, который следует использовать в ходе данного процесса. Если продукт плохо переносит изменения определенной регулируемой переменной, то для этой переменной потребуется точный датчик, хорошо настроенный регулятор, а также правильная задача размеров исполнительного элемента. Кроме того, может потребоваться точное регулирование других параметров процесса, воздействующими на критичную переменную.

Регулирование по большей части является косвенным, то есть характеристики продукта (вкус, текстура, внешний вид, снижение микробиологической нагрузки) не подвергаются непосредственному измерению, а регулируются косвенно — за счет регулирования тех переменных, замер которых осуществить проще (например, температуры, давления, расхода). Нередко такие заключения требуют определенного постоянства как сырья, так и смешивания. Изменения в используемом сырье, как правило, случаются нечасто. Настройка заданных значений и других рабочих параметров может быть спрогнозирована на основании проводимых в лабораториях проверок характеристик используемого сырья.

В целях замера характеристик продукта в оперативном режиме предлагается использование более сложных датчиков. В качестве примера таких датчиков могут быть приведены газовые хроматографы, масс-спектрометры и спектрофотометры, однако такие устройства требуют повышения квалификации пользователей, а также большего технического обслуживания. Обоснование затрат на такого рода датчики должно включать в себя не только их цену, но и дополнительные договоры на техническое обслуживание и текущий ремонт.

Важной целью при разработке систем регулирования является их простота. Любое усложнение следует внедрять в систему только там, где это действительно оправдано. Удержание количества устройств на минимальном уровне снижает количество потенциально подверженных поломке компонентов и упрощает требования, предъявляемые к общему техническому обслуживанию системы.

При разработке системы регулирования необходимо также учитывать и те переходящие условия, возникновение которых возможно в ходе технологического процесса. Примерами кратковременных состояний могут служить запуск, останов и переход от производства одного изделия к другому. Учет таких состояний может помочь снизить количество бракованной продукции и способствовать лучшему срабатыванию системы. Например, тепловая нагрузка сушилки или печи при смене продукта может значительно измениться. В этом случае систематическое изменение температур и расходов, подстраиваемое под происходящее изменение нагрузки, может помочь уменьшить количество продукта с чрезмерным или же недостаточным теплообменом. При нагреве жидкого продукта обеспечение необходимого количества тепла до момента достижения производственной линией определенной температуры поможет избежать подплавления продукта на поверхности теплообмена, что позволит добиться более высокой эффективности теплообмена в процессе работы.



## 16.11 Примеры контуров регулирования

### 16.11.1 Теплообменники

На рис. 16.12 приведены примеры регулирования температуры жидкости. В контур регулирования нагрева входит паровой теплообменник с температурно-паровым каскадным контуром управления.

Охлаждение осуществляется за счет жидкостного теплообменника. Здесь может отпасть необходимость в первичном контуре каскада при наличии чрезмерной площади теплообмена и при поддержании температуры циркуляции, близкой к необходимой для данного продукта.

В контурах регулирования температуры существует время запаздывания, которое объясняется временем транспортировки от точки теплообмена к датчику, а также периоды задержки из-за времени, необходимого для установления равновесия теплообменника и датчика. Для усовершенствования процесса регулирования желательно уменьшить как время запаздывания, так и задержек.

Время задержки может быть сведено к минимуму за счет размещения датчика рядом с выходом теплообменника. В некоторых случаях (например, при нагреве посредством прямого впрыска пара), необходимо сохранять минимальное расстояние, которое позволит добиться поддержания равномерной температуры продукта.

Задержки могут быть уменьшены посредством использования температурных датчиков малого диаметра. Во избежание колебаний времени задержки и для сохранения скорости теплообмена в системах контуров охлаждения, подобных отображенной на рис. 16.12, важно поддержание значительной интенсивности расхода теплопередающей среды.

Кроме прочего, высокий расход будет способствовать заполнению теплообменника, что предотвратит канализирование и неустановившийся теплообмен на всей площади поверхности.

### 16.11.2 Нагрев и охлаждение партий продукции

Очень часто партии продуктов охлаждаются и нагреваются внутри тех резервуаров, в которых осуществляется их смешивание. Из-за большого количества обрабатываемой продукции реакция температуры смеси происходит очень медленно. Рециркуляция в теплообменнике обеспечит ускорение и большую эффективность теплообмена за счет монтажа дополнительного оборудования, то есть насоса, теплообменника и трубопровода. Другой возможностью является нагрев или охлаждение отдельных составляющих при температуре, близкой к необходимой, до их добавления в дозирующий резервуар.

Если предполагается достижение значительных изменений температур с использованием закрытого кожухом резервуара, то для способствования теплообмену рекомендуется хорошее смешивание продукции. Последствия плохого перемешивания/теплообмена могут выражаться в замедленной реакции и значительных колебаниях

температур. В некоторых случаях при отсутствии какого-либо ограничения нагревательной или охлаждающей среды возможна порча продукта. При использовании нагрева за счет плохого перемешивания или слишком высокой температуры нагревательной среды возможно прилипание продукта к стенкам резервуара.

При охлаждении в случае отсутствия в партии продукта ожидаемого равновесия материалов возможна выборочная кристаллизация компонентов.

### 16.11.3 Температура в резервуарах хранения

От резервуаров хранения продуктов или их компонентов часто требуется удержание содержимого в определенном диапазоне температур. Для поддержания определенных диапазонов температур продукта, как правило, достаточно использования двухпозиционного регулирования, однако необходимо принять меры, позволившие бы обеспечить нахождение соответствующей среды в пределах определенных допусков, предотвращая таким образом перегрев или кристаллизацию хранимого материала.

Альтернативой двухпозиционному регулированию в резервуарах хранения, поддерживающему температуру продукта, может быть поддержание температуры среды кожуха на уровне заданного значения, предполагаемого для сохранения продукта. Это поможет избежать ухудшения параметров продукции, вызываемых пиками температур стенок резервуара, но в то же время не позволит быстро компенсировать температурные нарушения, возможные в момент добавления в резервуар новых ингредиентов. Температура продукта внутри резервуара более не используется в качестве регулируемой переменной (вернее, температура продукта регулируется косвенно за счет управления температурой среды). Этот метод может использоваться с достаточной степенью уверенности, поскольку, следуя закону термодинамики, температура продукта будет асимптотически приближаться к температуре среды. Можно предположить, что по прошествии достаточного количества времени она придет в устойчивое состояние. Это особенно полезно для тех резервуаров хранения, в которые материал поступает при температуре, близкой к необходимой температуре хранения. Несмотря на то что температура продукта не используется в качестве управляющего сигнала, тем не менее для индикации проблем, возникающих в системе, следует пользоваться аварийными сигналами.

### 16.11.4 Печи и сушилки

Правильное размещение температурных датчиков в печах и сушилках является очень важным фактором. Температурные датчики следует размещать на тех участках, где воздух хорошо вентилируется и показателен для воздействия температуры на продукт.

Температуры воздуха на входе и на выходе свидетельствуют о тепловой нагрузке в системе, и, как правило, чаще всего используются в процессе регулирования. Регулирование расхода воздуха зачастую осуществляется с помощью открываемых вручную задвижек. Для каждого продукта требуется различная скорость сушки и/или

теплообмена, которая позволила бы ему достичь необходимой влажности и других соответствующих характеристик.

При сушке температурная кривая воздуха на входе в большинстве случаев со временем будет снижаться. В начале возможно использование высоких температур, поскольку на поверхность постоянно подается влага. Когда массоперенос влаги с внутренней стороны продукта к поверхности ограничивается, температуры, как правило, понижаются, что позволяет не допустить их отрицательного воздействия на продукт. Результатом слишком быстрой сушки поверхности может стать образование корочки, существенно ограничивающее дальнейшее высушивание внутренней части продукта.

Окончательный замер содержания влаги в продукте, как правило, достаточно сложен. Тем не менее здесь возможно использование косвенного регулирования. На этапе снижения скорости сушки содержание влаги относится к температурам воздуха следующим образом:

$$M = C \ln \left( \frac{T_i - T_w}{T_o - T_w} \right), \quad (16.16)$$

где  $M$  — содержание влаги в продукте;  $C$  — зависящая от системы постоянная;  $\ln$  — натуральный логарифм;  $T_i$  — температура воздуха на входе;  $T_o$  — температура воздуха на выходе;  $T_w$  — температура влажного термометра для воздуха на входе.

В некоторых процессах сушки содержание влаги в продукте может регулироваться за счет контроля температур системы и управления ими.

### 16.11.5 Объемный расход

Регулирующим элементом, представленным на рис. 16.12, является насос, а на рис. 16.15 — клапан. Обратите внимание, что датчики расхода расположены до регулирующих элементов. Это делается потому, что возмущения в расходе, вызываемые исполнительными элементами, способны воздействовать на точность и стабильность измерения расхода. Как правило, к каждому из датчиков предъявляются определенные требования по их монтажу, на которые необходимо обращать пристальное внимание, чтобы добиться точности в измерении расхода.

По сравнению с остальным трубопроводом датчик расхода может быть меньшего диаметра. Возможно, это потребует установки байпаса, необходимого для наличия достаточного расхода в процессе безразборной мойки.

### 16.11.6 Противодействие

Во избежание испарения продукта во многих процессах нагрева необходимо регулирование давления. Для предотвращения подгорания продукта монтируется регуля-

тор противодействия. Такой тип регулирования схож с регулированием расхода. В большинстве случаев регулирующий элемент представляет собой клапан, но эту роль может выполнять также и объемный насос. Часто контур противодействия является наиболее быстрым контуром в системе нагрева. Поскольку даже в случае регулирования за счет насоса (на объемных насосах возможно проскальзывание) противодействие способно повлиять на расход, то соответствующий контур необходимо будет настроить таким образом, чтобы предотвратить взаимодействие обоих контуров.

## 16.12 Заключение

Пищевая промышленность еще не стала лидером в области эксплуатации контуров управления. Первенство здесь принадлежит отраслям промышленности с более высокими нормами прибыли, более продолжительными производственными циклами и значительной конкуренцией (например, нефтехимическая и автомобильная промышленность). Пищевая промышленность воспользовалась прогрессом в технологиях управления производством в тот момент, когда эти технологии подешевели, а их использование упростилось. Рост общей конкуренции, а также необходимость снижения себестоимости станут причинами расширения использования методов управления технологическими процессами. Увеличение числа новых пищевых продуктов, а также сокращение сроков их хранения заставят инженеров-технологов конструировать системы, обладающие укороченным сроком запуска, а также способные адаптироваться к выпуску новой продукции. Управление технологическим процессом не замыкается само в себе, а является важным инструментом, позволяющим фирмам сохранить конкурентоспособность.

## Список обозначений

$a$	— ускорение массы
$A$	— амплитуда изменений на входе
$A/D$	— преобразователь аналогового сигнала в цифровой
$C$	— системная константа
$CIP$	— безразборная мойка ( <i>Clean-In-Place</i> )
$C_v$	— коэффициент клапана
$DCS$	— распределенная управляющая система
$^{\circ}F$	— градусы по Фаренгейту
$\Delta P$	— перепад давлений (фунтов на кв. дюйм)
$e$	— число Эйлера (2,718...)
$E$	— ошибка
$F$	— сила, воздействующая на данную массу
$G$	— пропорциональное звено контроллера
$G_u$	— полное звено
$HTST$	— высокотемпературный кратковременный

I/O	— вход/выход
I/P	— преобразователь электрического сигнала в пневматический
ln	— натуральный логарифм
m	— масса
M	— содержание влаги в продукте
M	— смещение контроллера
mA	— миллиамперы
O	— выход контроллера
P	— данные, измеренные в ходе процесса
P&ID	— диаграмма измерения в ходе процесса
PB	— пропорциональная связь
PLC	— программируемый логический контроллер
$P_s$	— удельный вес
psig	— калибровка в фунтах на кв. дюйм
$P_u$	— полный период
Q	— расход (галлонов/мин)
SLC	— контроллер единичной петли
SP	— точка настройки процесса
$\tau$	— системная константа времени первого порядка
t	— время с начала шагового изменения
$t_d$	— параметр настройки производной времени
$T_i$	— температура воздуха на входе
$t_i$	— параметр сброса или настройки интеграла времени
$T_o$	— температура воздуха на выходе
$T_w$	— температура воздуха на входе по влажному термометру
Y	— реакция системы
ПИД	— пропорциональный, интегральный, дифференциальный

## Литература

1. Flow Equations for Sizing Control Valves (ANSI/ISA-575-S75-1985) / Instrument Society of America. — Research Triangle Park, NC: ANSI/ISA, 1985.
2. Instrument Symbols and Identification (ANSI/ISA-S5.1-1984) / Instrument Society of America. — Research Triangle Park, NC: ANSI/ISA, 1992.
3. Process Instrumentation Terminology (ANSI/ISA-S51.1-1979) / Instrument Society of America. — Research Triangle Park, NC: ANSI/ISA, 1979.
4. Bauman, H. D. Control Valve Primer. — 2nd ed. — Research Triangle Park, NC: Instrument Society of America, 1994.
5. Corripio, A. B. Tuning of Industrial Control Systems. — Research Triangle Park, NC: Instrument Society of America, 1990.
6. Liptak, B. G. and Venczel, K. Instrument Engineers' Handbook — Process Control. — Rev. ed. — Radnor, PA: Chilton, 1985.
7. McMillan, G. K. Tuning and Control Loop Performance. — 3rd ed. — Research Triangle Park, NC: Instrument Society of America, 1994.
8. Digital Controller Tuning AM-35. — Issue 3 / Moore Products Co. — Springhouse, PA: Moore Products Co., 1990.
9. Peters, M. S. and Timmerhaus, K. D. Plant Design and Economics for Chemical Engineers. — NY: McGraw Hill, 1968.
10. Ziegler, J. G. and Nichols, N. B. Optimum settings for automatic controllers // Trans. ASME. — 1942. — № (64). — P. 759.

## Дополнительная отечественная литература

1. Митин В. В., Усков В. И., Смирнов Н. Н. Автоматика и автоматизация производственных процессов мясной и молочной промышленности. — М.: Агропромиздат, 1987. — 239 с.
2. Полоцкий Л. М. Лапшенков Г. И. Автоматизация химических производств. — М.: Химия, 1982. — 295 с.
3. Евдокимова Г. М., Селевцов Л. И. Автоматизация производственных процессов в мясной и молочной промышленности. — М.: Колос, 2000. — 237 с.

# 17 ПИЩЕВАЯ ХИМИЯ ДЛЯ ИНЖЕНЕРОВ

*Дж. Вартхезен, М. Мюленкамп*

*Пер. Н. Савченкова под ред. к. т. н., доцента А. Л. Ишевского*

## Содержание

- 17.1 Введение
- 17.2 Химия нутриентов
  - 17.2.1 Вода
    - 17.2.1.1 *Распространение воды в природе*
    - 17.2.1.2 *Вода в качестве ингредиента*
    - 17.2.1.4 *Активность воды*
    - 17.2.1.5 *Стеклование*
  - 17.2.2 Физическая химия дисперсных сред
    - 17.2.2.1 *Коллоидные дисперсные среды*
    - 17.2.2.2 *Гели*
    - 17.2.2.3 *Эмульсии*
    - 17.2.2.4 *Пены*
  - 17.2.3 Углеводы
    - 17.2.3.1 *Сахара*
    - 17.2.3.2 *Реакции сахара*
    - 17.2.3.3 *Потемнение вследствие реакции Майяра*
    - 17.2.3.4 *Целлюлоза*
    - 17.2.3.5 *Крахмал*
    - 17.2.3.6 *Модифицированные крахмалы*
    - 17.2.3.7 *Преобразование крахмала в сахар*
    - 17.2.3.8 *Гетерополисахариды и смолистые вещества*
  - 17.2.4 Белки
    - 17.2.4.1 *Структура и функции*
    - 17.2.4.2 *Денатурирование белков под воздействием тепла*
    - 17.2.4.3 *Влияние pH*
    - 17.2.4.4 *Влияния солей*
    - 17.2.4.5 *Ферменты*

**17.2.5 Жиры**17.2.5.1 *Химическое строение*17.2.5.2 *Функции жиров*17.2.5.3 *Окисление липидов*17.2.5.4 *Масла, используемые для жарки***17.2.6 Пигменты и красители**17.2.6.1 *Жирорастворимые красители*17.2.6.2 *Водорастворимые красители*17.2.6.3 *Пигменты мяса*17.2.6.4 *Красители как пищевые ингредиенты***17.2.7 Витамины и минеральные вещества****17.2.8 Вкус и аромат**17.2.8.1 *Вкус*17.2.8.2 *Аромат*17.2.8.3 *Нежелательные вкусо-ароматические качества***17.3 Химические реакции при обработке пищевых продуктов**17.3.1 *Хлеб*17.3.2 *Плавленный сыр*17.3.3 *Сосиски (хот-доги)*17.3.4 *Консервированные зеленые бобы*17.3.5 *Майонез*17.3.6 *Картофельные чипсы*17.3.7 *Сухие завтраки (мюсли)*17.3.8 *Кексы на основе шортенингов*

Глоссарий

Обозначения

Литература

## 17.1 Введение

В этой главе мы рассмотрим наиболее существенные химические реакции, происходящие в процессе обработки пищевых продуктов и их движения от производителя к потребителю. В то время как характеристики и состав пищевых продуктов значительно разнятся, большая их часть сходна по химическому составу органических соединений. Глубина протекания химических реакций в пищевых продуктах различна, но определенную пищевую систему можно распознать по основным реакциям, на которые оказывают влияние способ и тип технологической обработки продукта, в результате чего продукт приобретает конкретные качественные характеристики.

Чтобы оптимизировать производство и регулировать качественный состав пищевых продуктов, инженер должен знать основные химические свойства и реакции и уметь управлять ими. Еще более остро встает вопрос понимания протекающих в технологическом процессе химических реакций и управления ими при внесении изменений в оборудование, условия переработки, состав или характеристики пищевых продуктов.

В целях удовлетворения потребности в общих знаниях, касающихся пищевой химии, химические реакции, протекающие в большинстве пищевых продуктов, будут



описываться ниже по участвующим в них компонентам, начиная с воды. Особое внимание при этом мы уделим воздействию тепла ввиду его основной роли в процессе переработки пищевых продуктов. Высокие температуры способны изменить химические характеристики и усилить реакции (вплоть до полного их изменения — ср. например, реакции цветообразования). И действительно, целью каждого термического процесса является химическое изменение, хотя иногда температура используется в качестве катализатора реакций. Временные и температурные параметры процесса обработки почти всегда рассчитаны таким образом, чтобы вызвать одну или несколько реакций.

В химическом разделе акцент будет сделан на четыре типичные реакции, имеющие в процессе переработки пищевых продуктов весьма важное значение: потемнение вследствие реакции Майяра, желатинизация крахмала, денатурация белков и окисление липидов. Влияние химических свойств на диапазон изменений характеристик пищевых продуктов будет рассмотрено при изучении физико-химических особенностей.

И наконец, в заключение мы рассмотрим химические реакции, протекающие в восьми различных пищевых системах, которые показывают взаимосвязи между отдельными химическими реакциями и вызываемыми изменениями, с которыми придется сталкиваться на практике у разных пищевых продуктов. Инженеру это даст возможность на практике проанализировать весь диапазон химических изменений в комплексных пищевых продуктах.

## 17.2 Химия нутриентов

### 17.2.1 Вода

#### 17.2.1.1 Распространение воды в природе

Молекула воды — одна из самых маленьких и наиболее простых молекул, встречающихся в пищевых продуктах. Тем не менее вода и содержание воды в продукте считаются едва ли не самыми важными параметрами в пищевой химии. В процессе переработки пищевых продуктов на долю воды выпадает множество различных функций, и несмотря на простоту химических взаимодействий ее влияние на протекающие в пищевых продуктах реакции, а также на их качество больше, чем влияние любого другого химического компонента.

При рассмотрении химического состава пищевых продуктов бросается в глаза тот факт, что воды в них содержится больше, чем любого другого ингредиента. Фрукты, овощи, напитки, соусы, пудинги, замороженные десерты и полуфабрикаты — все они отличаются высоким содержанием воды. Кроме очевидного воздействия на параметры качества, определяющие чрезмерную сухость или влажность продукта, количество влаги обладает и огромным экономическим значением, поскольку большая часть пищевых продуктов продается по их весу.

Вода содержится даже в явно «сухих» продуктах, а содержание влаги, как правило, является критерием для качественных характеристик продукта. Сухие блюда из

Таблица 17.1 Содержание и активность воды некоторых пищевых продуктов

Пищевой продукт	Вода, %	Активность воды, $a_w$
Персики	87	0,99–1,0
Шоколадное молоко	82	0,99
Инжир	79	0,97
Яйца	78	0,97–0,98
Мясо	70	0,97–0,99
Консервированная ветчина	61	0,95–0,91
Сливочный сыр	54	0,87–0,91
Хлеб	40	0,95–0,98
Сухофрукты	20	0,75–0,80
Мед	17	0,60–0,75
Блюда из макарон, сухие	12	0,50
Крекеры	5	0,1–0,3
Яичный порошок	5	0,4

различных круп (например, мюсли), сухое печенье, крекеры и порошкообразные ингредиенты (мука и соль) — все они содержат влагу, поддающуюся замеру. Одним из немногих пищевых продуктов, в состав которого не входит значительное или поддающееся замеру количество воды, является масло. Содержание воды в некоторых пищевых продуктах представлено в табл. 17.1.

#### 17.2.1.2 Вода в качестве ингредиента

Вода является составной частью многих переработанных пищевых продуктов. Забавно, что воду часто добавляют на одном из ранних этапов обработки, а затем удаляют в процессе сушки. Это предполагает своего рода временную функцию<sup>1</sup>, выполняемую водой в некоторой промежуточной точке схемы обработки продукта — в противном случае вполне можно было бы избежать хлопот с добавлением воды, а также и затрат на последующую сушку.

Когда вода выступает в качестве нутриента, она несет с собой гораздо больше, чем просто молекулы  $H_2O$ , обычно ассоциируемые с водой. В зависимости от состояния вода может быть связанной и свободной. Форма состояния  $H_2O$  определяет энергию связи и состав связанных с ней нутриентов.

Иногда создается впечатление, что технологические установки на различных производствах выпускают слегка отличающиеся продукты, причем единственным бросающимся в глаза их отличием является содержание влаги. В воде также могут присутствовать хлор, фтор, микроорганизмы, паразиты, ароматические соединения, кислоты и щелочи, загрязняющие вещества из окружающей среды и различного рода примеси. Чтобы устранить присущие местному водоснабжению колебания в составе воды, может потребоваться фильтрование воды на производстве или другие способы ее обработки.

<sup>1</sup> «Временная функция»  $H_2O$  заключается в инициировании ферментативных реакций в пищевых продуктах с низким содержанием влаги. — *Прим. науч. ред.*

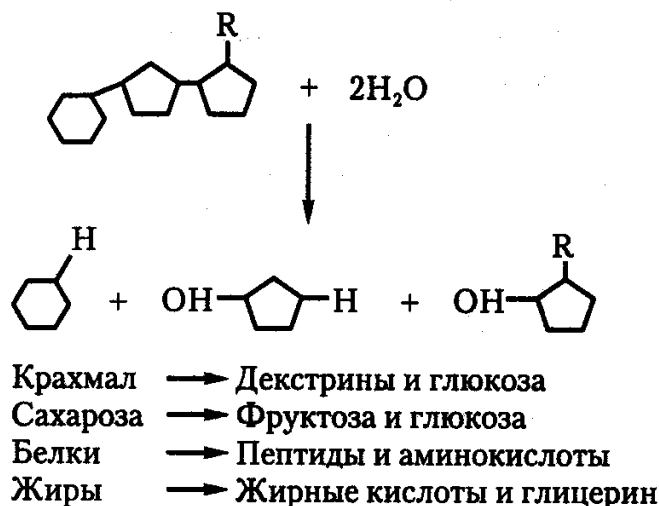


Рис. 17.1. Схема гидролиза нутриентов

### 17.2.1.3 Свойства воды и реакции с ее участием

Вода представляет собой полярную молекулу и поэтому выступает для различных полярных соединений в пищевых продуктах в качестве растворителя. Молекула воды представляет собой диполь с отрицательной областью рядом с атомом кислорода и положительными областями рядом с атомами водорода. Этим отчасти объясняется тот факт, что вода хорошо нагревается в микроволновом поле. При воздействии микроволн молекулы воды вибрируют и слегка сталкиваются друг с другом с выделением теплоты вследствие трения [14]. Упомянутый дипольный характер также позволяет молекулам воды образовывать друг с другом и с другими полярными молекулами пищевых продуктов водородные связи, например, углеводы и белки. Одним из воздействий, оказываемым на пищевые продукты теплом (в особенности умеренным теплом), является разрыв водородных связей. Эти изменения мы более подробно рассмотрим в последующих разделах.

В процессе переработки пищевых продуктов активное участие принимает вода в твердом (лед), жидком и газообразном состояниях. Физические свойства и способность к химическим реакциям и физические свойства различных форм воды в значительной степени отличаются друг от друга. Жидкая вода в пищевых продуктах фактически инертна. Как правило, она не разрушается, а скорее меняет свое состояние и испаряется в процессе технологической обработки<sup>1</sup>.

Одной из реакций, которая заставляет молекулы воды разлагаться на части, является гидролиз. Значимость реакции гидролиза заключается в способности воды разлагать на части и другие молекулы в пищевых продуктах, например, молекулы белков, крахмала или жиров. Реакции гидролиза обычно приводят к изменениям функциональных свойств, поскольку становится возможным укорачивание полимеров и получение новых вкусовых соединений. Схема некоторых реакций гидролиза представлена на рис. 17.1.

### 17.2.1.4 Активность воды

Хотя для оценки возможности протекания определенных химических реакций под воздействием воды может быть использовано фактическое содержание воды в пищевом продукте, многокомпонентность пищевых продуктов делает систему слиш-

<sup>1</sup> Это относится только к свободной, не связанной воде. — Прим. науч. ред.

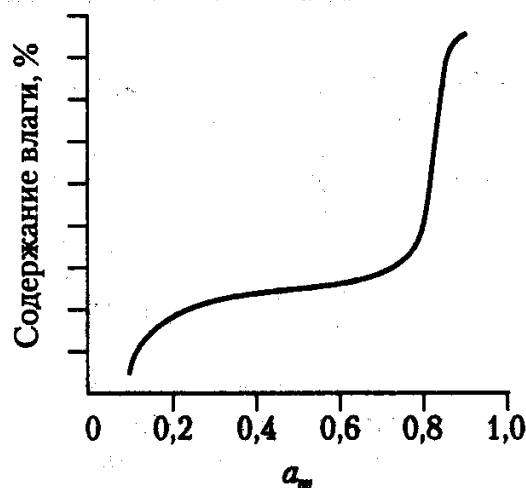


Рис. 17.2. Типовая сорбционная изотерма пищевого продукта

ком сложной, и использовать процентный состав воды для точного прогнозирования химических реакций довольно затруднительно. В качестве более мощного инструмента для предсказания воздействия воды на химические реакции, протекающие в пищевых продуктах, вводится понятие *активности воды*  $a_w$ , которая в пищевых продуктах может быть выражена следующими уравнениями:

$$a_w = P/P_0,$$

где  $P$  — давление водяного пара в пищевом продукте;  $P_0$  — давление водяного пара чистой воды при тех же условиях<sup>1</sup>.

$$a_w = \text{относительная влажность пищевого продукта}/100$$

или

$$a_w = \text{количество воды}/(\text{количество воды} + \text{количество растворимых веществ}).$$

Активность воды ( $a_w$ ) колеблется от 0 до 1,0. В принципе, пищевой продукт стремится к равновесию с относительной влажностью среды (равновесность по относительной влажности подчиняется закону Рауля). Этим можно объяснить то, что ломтик хлеба ( $a_w$  около 0,96), оставленный в помещении с относительной влажностью 50%, будет терять влагу, а крекер ( $a_w$  около 0,10) — ее накапливать, в результате качество и того, и другого продукта окажется утраченным. Это означает также, что в упакованном продукте смешанные компоненты, например, сушеные фрукты и хлопья, будут стремиться к уравниванию значения  $a_w$  друг друга. Поглощение или потеря влаги, вызываемые разницей в относительной влажности между продуктом и его окружением, зачастую приводят к изменениям качественных характеристик. Для

<sup>1</sup> При подстановке вместо  $P/P_0$  относительной влажности  $\phi$  можно получить выражение для расчета свободной энергии или энергии связи влаги  $\mu = -RT \cdot \ln \phi$ , где  $\mu$  — значение химического потенциала. Это выражение может быть использовано для расчета характеристик связанной воды в пищевом продукте (см. работы П. А. Ребиндера и Л. Б. Цимерманиса). — Прим. науч. ред.

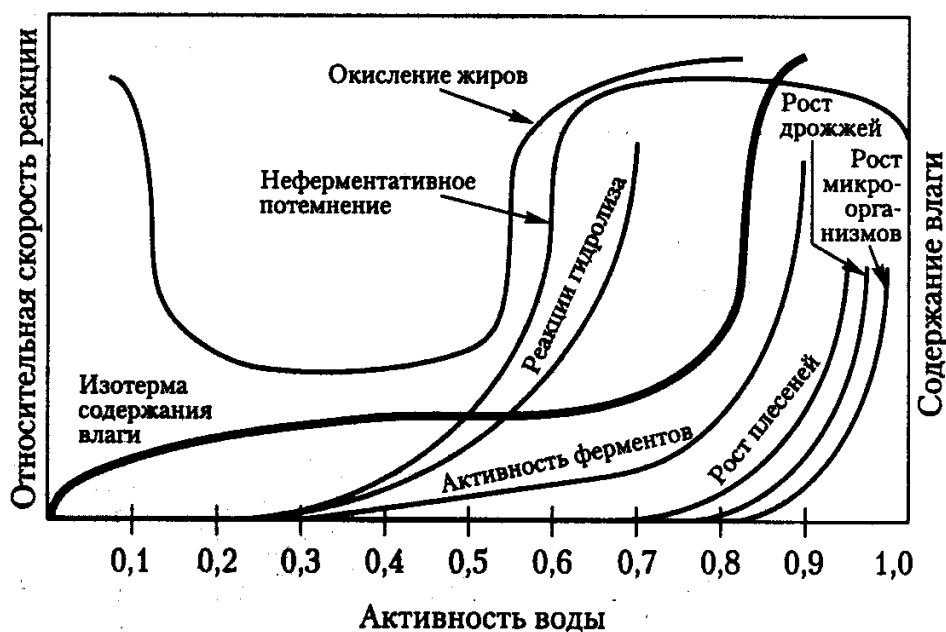


Рис. 17.3. Расчетное соотношение между  $a_w$  и скоростью химических реакций, протекающих в пищевых продуктах (в сравнении с сорбционной изотермой). По [10].

защиты пищевого продукта от влияния относительной влажности среды используются упаковки, непроницаемые для водяного пара. Для сухих завтраков, например, диапазон значений содержания влаги и  $a_w$  должен быть ограничен. Если продукт окажется слишком сухим, то возможны физическое разрушение структуры и нежелательные химические реакции. Если же продукт будет слишком влажным, то станет очевидным отсутствие его рассыпчатости.

Отношение  $a_w$  к содержанию воды в определенной пищевой системе отображено на сорбционной изотерме, представленной на рисунке 17.2. При низкой активности воды ( $a_w$ ) и низком ее содержании молекулы воды распределяются монослоем, называемым химиками слоем BET [6]<sup>1</sup>. В этом состоянии вода плотно связана пищевыми компонентами и с трудом поддается удалению в процессе сушки. У этих молекул воды низкая упругость пара, они не образуют льда при температуре замерзания и не растворяют компонентов пищевых продуктов, которые в противном случае оказались бы растворимы в воде.

При воздействии более высокой относительной влажности пищевой продукт накапливает большее количество влаги. Эти дополнительные молекулы воды известны под названием «многослойной воды». При еще более высокой влажности и активности воды ( $a_w$ ) ее способность вступать в реакции увеличивается, такая вода называется несвязанной водой. В замороженных продуктах количественное соотношение льда и воды в жидкой фазе зависит от температуры. Поскольку упругость пара определяется жидкой водой, то  $a_w$  зависит в первую очередь от температуры<sup>2</sup>.

За счет  $a_w$  осуществляется управление не только химическими реакциями — этот показатель также оказывает воздействие и на рост микроорганизмов при порче и

<sup>1</sup> Чем ниже  $a_w$ , тем прочнее вода связана с нутриентами продукта. Считается, что изотерма делится на три участка: 1 — вода прочно связана, 2 — вода связана слабо и 3 — вода находится в капиллярах и относительно доступна для реакции (см. Вода в пищевых продуктах. — М.: Пищ. пром-сть., 1980. — Прим. науч. ред.

<sup>2</sup> Это не всегда отражает истинное состояние  $H_2O$  в пищевых продуктах. — Прим. науч. ред.

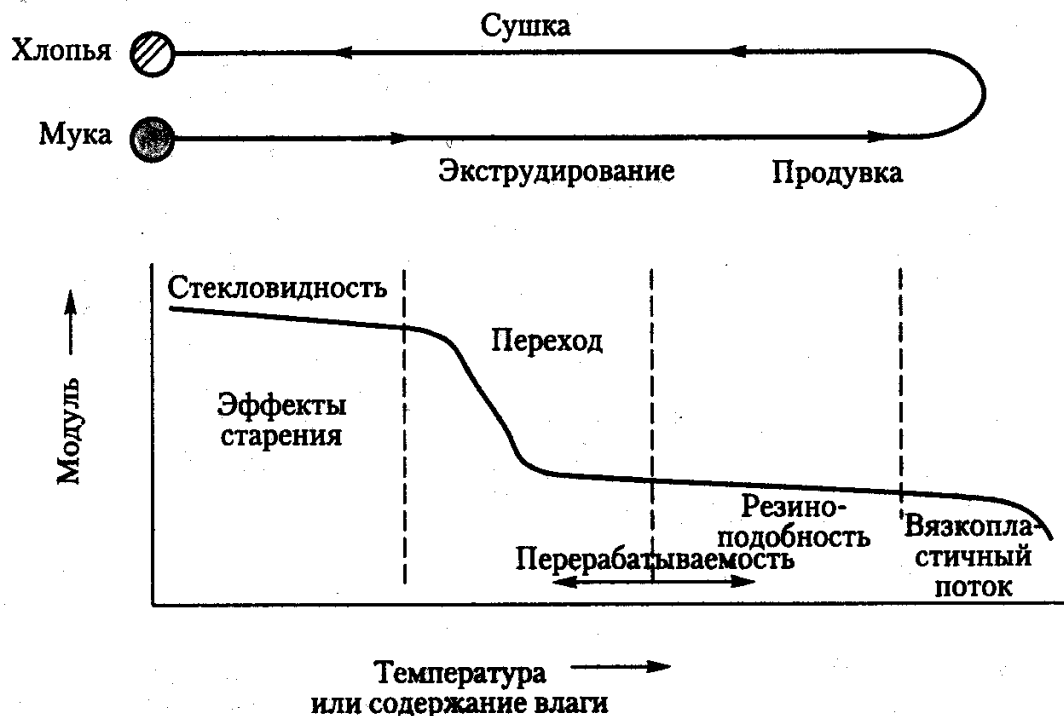


Рис. 17.4. Пример превращения муки в готовые к употреблению хлопья. В данном примере для отображения процесса изготовления комплексного пищевого продукта используется соотношение температуры стеклования  $T_g$  к содержанию влаги. По [12]

брожении продукта. Чтобы проиллюстрировать, каким образом  $a_w$  может влиять на реакции, протекающие в пищевых продуктах, в работе [10] были проанализированы некоторые основные химические реакции и общий рост микроорганизмов. Итоги этой работы приведены на рис. 17.3.

#### 17.2.1.5 Стеклование

Воздействие воды на текстуру пищевых продуктов может быть проиллюстрировано также с помощью понятия стеклования. Белки и крахмал — это полимеры с некоторой температурой стеклования  $T_g$ . При температуре ниже температуры стеклования полимеры будут находиться в стеклообразном состоянии, а при ее превышении их состояние будет резиноподобным. При прохождении полимером  $T_g$  происходит значительное изменение модуля. При увеличении или уменьшении содержания влаги  $T_g$  может меняться, и пищевые продукты могут перейти в резиноподобное (ненапряженное или текучее) состояние. Таким образом, влага способна управлять поведением белков и сложных углеводов, и особенно это касается текстуры.

Зерновые продукты, содержащие полимеры белков и крахмала, являются хорошим примером воздействия температуры и содержания влаги на стеклообразную или резиноподобную текстуру. На рис. 17.4 это воздействие показано для некоторого продукта, в основе которого мука. При добавлении в экструдер воды и тепла полимеры становятся резиноподобными и эластичными. Сушка после экструзии позволяет вернуться к стеклообразному (хрустящему) состоянию. Если же сухой зерновой продукт впитает влагу, то он перестанет быть хрустящим и перейдет в резиноподобное состояние. Более подробная информация, касающаяся стеклования в зерновых продуктах, приведена в [9] и [19].

## 17.2.2 Физическая химия дисперсных сред

### 17.2.2.1 Коллоидные дисперсные среды

Коллоидные пищевые системы включают дисперсионную среду (ДС) и дисперсную фазу (ДФ). Твердое тело, диспергированное в жидкости, называется золев (пример диспергирования белков молока в воде может служить молочная сыворотка). Жидкость (например, растительное масло), диспергированная в воде, может быть отнесена к эмульсиям, примером которой может служить заправка для салата. Газ, диспергированный в жидкость, представляет собой пену, примером которой могут служить взбитые яичные белки.

В ходе технологической обработки и последующих продаж пищевых продуктов одной из целей является поддержание дисперсионных сред в состоянии, препятствующем разделению фаз. Так, для большинства салатных заправок разделение на масляный и водяной слой непривлекательно и нежелательно. Произойдет ли такое разделение в ходе технологического процесса (например, при заполнении бутылок) или при хранении (на полке бакалейного магазина), результатом разделения фаз в любом случае окажется непригодный к использованию продукт.

В пищевых диспергированных средах силы, разделяющие фазы, естественны и многочисленны. Если диспергированные частицы слишком велики, они будут всплывать или оседать под воздействием силы тяжести и различий в плотности отдельных фаз. Гомогенизация молока используется для того, чтобы уменьшить размер капель жира и тем самым снизить разделение фаз под воздействием силы тяжести. Ввиду неоднородности ДФ движущей силой разделения является поверхностное или межфазное натяжение.

Еще одним фактором стабилизации пищевых диспергированных сред может стать статический заряд диспергированных частиц. Если все частицы будут иметь положительный или отрицательный заряд, то они будут отталкивать друг друга и останутся диспергированными. Если же за счет изменения кислотности заряд частиц окажется преобразован в нейтральный, то взаимное отталкивание частиц прекратится и диспергированные частицы могут потерять свою способность оставаться диспергированными. Этот факт является причиной осаждения некоторых белковых суспензий при определенном уровне pH.

Еще одним фактором, влияющим на стабильность диспергированных сред, является вязкость. В случае, если непрерывная фаза может быть утолщена, то диспергированным частицам будет сложнее двигаться навстречу друг другу, и разделение станет менее вероятным. Так, добавление в салатную заправку загустителя затруднит отделение жира, а когда сливочное масло холодное, непрерывная фаза жира предотвращает отделение диспергированных капель воды. При нагреве масла жир плавится, становясь при этом гораздо тоньше и позволяя воде отделиться от масла.

### 17.2.2.2 Гели

Гели формируются при создании полимерами сети взаимодействующих «нитей», которые задерживают воду и придают продукту полутвердый внешний вид [18]. Примерами гелей из значительно отличающихся друг от друга полимеров могут служить желатинизированные закуски, йогурты, пудинги и желе. Способностью к геле-

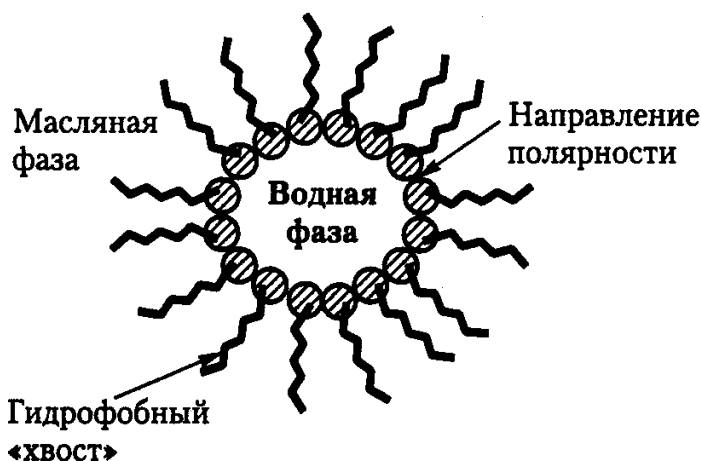


Рис. 17.5. Ориентация эмульгатора в двухфазной системе

образованию обладают только определенные пищевые полимеры, а основой гелеобразования является свойство полимеров связывать воду и взаимодействовать между собой.

Если связанные между собой полимеры ассоциированы слишком сильно, то связанная вода выталкивается и вне геля появляется жидкость. Такое отделение называется синерезисом<sup>1</sup> и проявляется, например, в отделении сыворотки, что для большинства гелей, подлежащих хранению, считается признаком ухудшения качества. Так, проявление синерезиса в йогуртах, преслованном твороге и пудингах нежелательно. Известно, что синерезису способствуют циклы замораживания и дефростации продукта. Процесс синерезиса в гелях может быть подавлен за счет добавления связывающих воду резиноподобных веществ (стабилизаторов) и увеличения содержания твердой фазы.

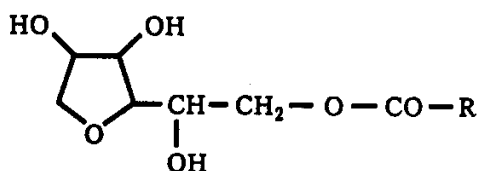
### 17.2.2.3 Эмульсии

Эмульсии представляют собой дисперсии масла в воде или воды в масле. Более подробно этот вопрос рассматривается в работе [11]. Поскольку эти две фазы обладают высоким межфазным натяжением, разделение происходит практически незамедлительно после смешивания воды и масла. Для достижения стабильности дисперсии жира и воды требуется добавление эмульгатора, то есть химического вещества, способного снизить межфазное натяжение и обеспечить более продолжительное диспергирование.

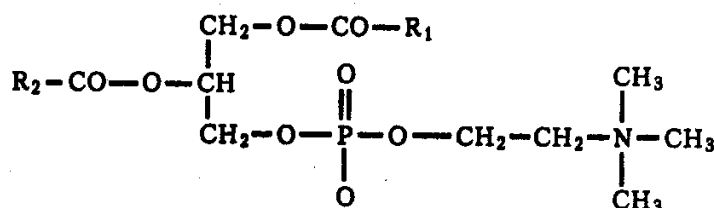
Эмульгаторы (или поверхностно-активные вещества, ПАВ) могут как присутствовать в пищевых продуктах, так и добавляться в них. Основными молекулярными характеристиками эмульгаторов является наличие в них неполярных и полярных областей, которые взаимодействуют соответственно с водой и жиром. За счет ориентирования на границе жира и воды эмульгаторы способны снизить межфазное натяжение и таким образом обеспечить некоторую стабильность эмульсии (рис. 17.5).

<sup>1</sup> Очевидно, имеется в виду эффект гистерезиса — независимость термодинамического состояния воды от того, каким образом подготовлена система. — *Прим. науч. ред*

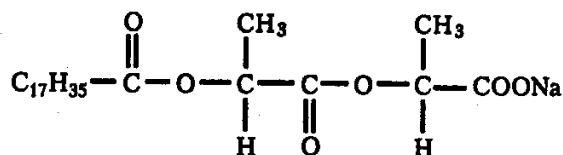




1,4-эфир сорбата



Лецитин



Стероил-2-молочнокислого натрия

Рис. 17.6. Химическое строение трех распространенных эмульгаторов, используемых в пищевых продуктах

Природные эмульгаторы встречаются в пленке, окружающей жир в молоке, в желтках яиц в форме лецитина и белков, содержащих липиды. Эмульгаторы, которые могут быть добавлены в эмульсии, включают в себя моно- и диглицериды, эфиры полиоксиэтиленовой жирной кислоты (полисорбаты), отдельные белки, фосфолипиды, эфиры сахарозы и многие другие соединения. Химическое строение некоторых эмульгаторов приведено на рис. 17.6. Выбор эмульгатора (от 0,25 до 0,5%) зависит от того, какая должна быть эмульсия — «вода в масле» или «масло в воде».

Некоторые из эмульгаторов имеют положительный заряд. За счет снижения поверхностного натяжения между фазой воды и фазой жира они способствуют предотвращению слияния капель жира друг с другом. Кроме того, такие эмульгаторы передают заряд каплям жира, результатом чего становится их отталкивание от других положительно заряженных частиц.

Помимо использования эмульгаторов эмульсии могут быть стабилизированы также за счет уменьшения размера диспергированных частиц до степени, дающей возможность противостояния разделению под воздействием силы тяжести [16]. Увеличение вязкости непрерывной фазы за счет добавления резиноподобных веществ или других загустителей также позволяет подавить разделение фаз. Поддержанию стабильности эмульсии способствует и предотвращение циклов замораживания и дефростации.

#### 17.2.2.4 Пены

Как правило, пены в пищевых продуктах — это воздух, диспергированный в воде, хотя иногда в процесс могут быть вовлечены и другие газы, например,  $\text{CO}_2$ , а также жидкости или полутвердые вещества (например, шортенинг). Как и в случае с эмульсиями, фазы пены ввиду различий в плотности и поверхностном натяжении в основе своей нестабильны.

В качестве пенообразующих веществ используются растворимые в воде белки, эмульгаторы и мыла (натриевые соли жирных кислот). Особенно хорошими пенообразующими веществами являются протеины яичных белков, поскольку в процессе взбивания они частично денатурируют, вытягиваются вдоль воздушных пузырьков и увеличивают вязкость водной фазы. При нагреве пены яичных белков они сгущаются (коагулируют) и неизменно задерживают пузыри воздуха в твердотельной структуре. В том случае, если в процессе обработки образование пены нежелательно, то для ее подавления может использоваться небольшое количество масла или промышленная пищевая антипенная добавка.

#### 17.2.3 Углеводы

Многочисленные углеводы по различным химическим свойствам и функциям подразделяются на сахара и полисахариды. Хотя некоторые молекулярные аспекты и являются общими для этих групп, функциональные характеристики сахаров и полисахаридов значительно отличаются друг от друга.

##### 17.2.3.1 Сахара

Наиболее часто встречающимися в пищевых продуктах сахарами являются моносахариды (глюкоза и фруктоза) и дисахариды (сахароза, лактоза и мальтоза). Все они являются натуральными веществами и часто добавляются в качестве ингредиентов (как в чистом виде, так и в составе другого ингредиента). Наиболее очевидным свойством, вносимым сахарами в пищевые продукты, является сладость, хотя сахара обладают неодинаковой сладостью. В качестве ориентира используется сахароза. Приписываемая ей относительная сладость составляет 1,0; фруктоза в 1,1–1,5 раза слаще, относительная сладость глюкозы составляет 0,7, мальтозы — 0,5, лактозы 0,3 [1]. Для получения определенной сладости один из видов сахаров может быть заменен другим, но при этом необходимо использовать разное их количество. Даже в этом случае для окончательного определения интенсивности сладости из-за синергического эффекта и воздействия среды необходимо использовать экспертную оценку органолептических показателей.

Все сахара гигроскопичны, а это означает, что сладкие пищевые продукты склонны к аккумуляции влаги и с трудом поддаются сушке ее испарением. Растворимость сахаров и их склонность к формированию кристаллов в процессе охлаждения и сгущения различна. В кондитерских продуктах сахара формируют кристаллы или аморфные структуры (твердые или мягкие конфеты). В основе текстуры сахарного печенья и сливочных помадок лежит кристалличность сахарозы. Концентрированные сахарные растворы (сиропы) придают подслащенным безалкогольным напиткам некоторую вязкость, которая становится очевидной при

сравнении с водой или безалкогольными напитками, подслащенными сильными сахарозаменителями.

Глюкоза и фруктоза содержатся в таких натуральных продуктах, как мед, фрукты и фруктовые соки. Для использования в качестве чистых ингредиентов глюкозу и фруктозу получают из зерна, и, как правило, применяют в качестве жидкого сиропа. Мальтоза, состоящая из двух остатков глюкозы, встречается в продуктах, претерпевших разложение крахмала. Сахароза — это глюкоза и фруктоза, объединенные в нереагирующий и нередуцированный сахар. При использовании в качестве чистого ингредиента сахарозу получают из сахарной свеклы или сахарного тростника. Отличительные признаки кристаллической сахарозы связаны скорее с размерами частиц, чем с источником ее происхождения.

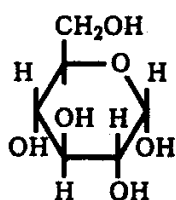
Лактоза, состоящая из глюкозы и галактозы, встречается исключительно в молоке и молочных продуктах. Люди с непереносимостью лактозы неспособны ее переваривать и поэтому при потреблении большого количества этого продукта могут испытывать дискомфорт. Этот факт объясняется тем, что в пищеварительной системе таких людей отсутствует расщепляющий лактозу фермент. В процессе брожения молочных продуктов лактоза преобразуется в молочную кислоту.

Сахарные спирты представляют собой производные сахара. Они могут быть натуральными, но чаще изготавливаются из сахаров и добавляются в качестве чистых ингредиентов. Сахарные спирты, являясь источником сладости, не сбрасываются присутствующими во рту бактериями, а значит не являются причиной разрушения зубов. Примерами подобных сахарных спиртов могут служить *сорбит*, *маннитол* и *ксилит*. По сравнению с сахарами сахарные спирты химически менее активны и медленнее перевариваются. При чрезмерном потреблении эти спирты могут стать причиной пищеварительного дискомфорта. Сахарные спирты используются в заменителях сахара, жевательной резинке и конфетах без сахара, хотя их калорийность составляет 4 кал/г, то есть равна калорийности сахаров.

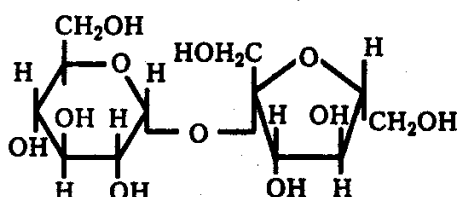
### 17.2.3.2 Реакции сахара

Ключевой характеристикой для реакционной активности сахара является наличие в нем кетонной или альдегидной группы, что делает его редуцирующимся сахаром. Большинство сахаров (за исключением сахарозы и сахарных спиртов) являются редуцирующими (рис. 17.7), но даже в этом случае сахар может гидролизаться, разлагаясь на свои составляющие, то есть глюкозу и фруктозу. Гидролиз, превращающий дисахариды в моносахариды, осуществляется за счет воздействия тепла, кислоты или ферментов. Кислая среда в безалкогольных напитках способна преобразовать сахарозу в глюкозу и фруктозу. Воздействие гидролиза сахарозы на сладость невелико, поскольку оба составляющих сахара дают схожий общий уровень сладости, однако способность сложных сахаров вступать в реакции гораздо выше, поскольку оба они являются редуцирующимися сахарами. Результатом гидролиза лактозы в галактозу и глюкозу является общее увеличение сладости.

При нагреве до высоких температур в результате карамелизации сахара разлагаются. Итогом последовательности вовлеченных в процесс реакций становится образование вкусовых соединений, потемнение и формирование полимеров с ограниченной растворимостью в воде.



Глюкоза



Сахароза

Рисунок 17.7. Сравнение редуцирующего сахара (глюкозы) с нередуцирующимся (сахарозой, столовым сахаром)

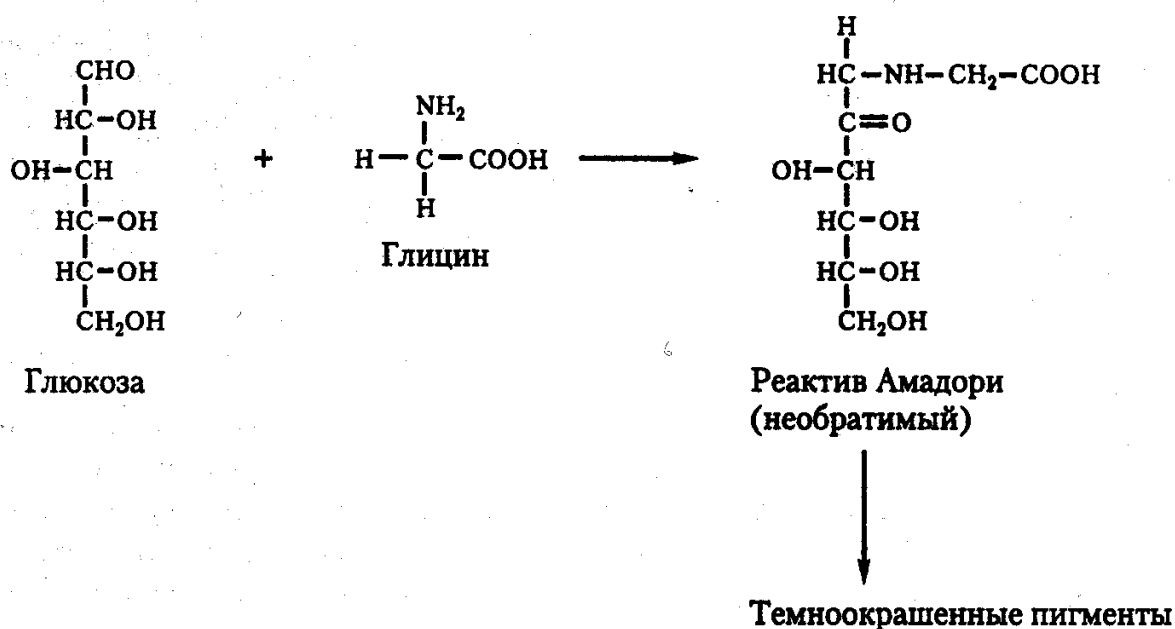
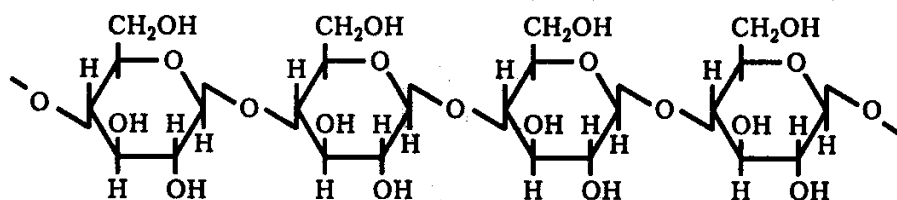


Рис.17.8. Упрощенная реакция Майяра. Карбонильное соединение (глюкоза) вступает в реакцию с аминокислотой (глицином) с образованием темноокрашенных пигментов

### 17.2.3.3 Потемнение вследствие реакции Майяра

Реакция Майяра происходит между карбонилем (альдегидной или кетонной группой), встречающимся в редуцирующем сахаре, и аминогруппой, присутствующей в белках и аминокислотах [7]. Результатом реакции в хлебной корочке, мясе, кофе, какао, картофельных чипсах и бобах становится развитие аромата и приобретение темного цвета. Результаты реакции Майяра зачастую весьма желательны, но ее чрез-



Целлюлоза

Рис. 17.9. Структура связи  $\beta$ 1-4 между элементами глюкозы в целлюлозе

мерность может стать причиной появления в продукте отрицательных свойств. Потемнение вследствие реакции Майяра подразумевает некоторую последовательность реакций, где образование цвета является последним этапом. Упрощенный ход такой реакции представлен на рис. 17.8.

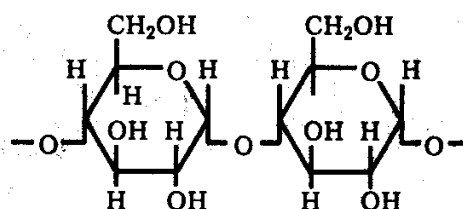
Реакция Майяра характерна для термической обработки, и, как правило, протекает при низких уровнях влажности, например, в процессе выпечки или поджаривания. На поверхности продуктов, выпеченных в микроволновой печи (в отличие от продуктов из стандартной печи), потемнение вследствие реакции Майяра незаметно. Этот факт объясняется тем, что поверхность продуктов, нагреваемых в микроволновой печи, как правило, более влажная, и нагрев происходит при температуре, не превышающей  $100^\circ\text{C}$ .

Другим важным фактором, влияющим на степень проявления реакции Майяра, является наличие редуцирующих или нередуцирующих сахаров, например, подвергаемой гидролизу сахарозы. Редуцирующие сахара могут быть добавлены в рецептуры с высоким содержанием сахарозы не для того, чтобы увеличить сладость, а для усиления реакции Майяра. Практических путей подавления реакции Майяра не существует, если не считать минимизации нагрева, поддержания продукта во влажном и кислом состоянии (низкий уровень pH способствует замедлению реакции) и удаления редуцирующих сахаров (удаление аминных групп менее целесообразно).

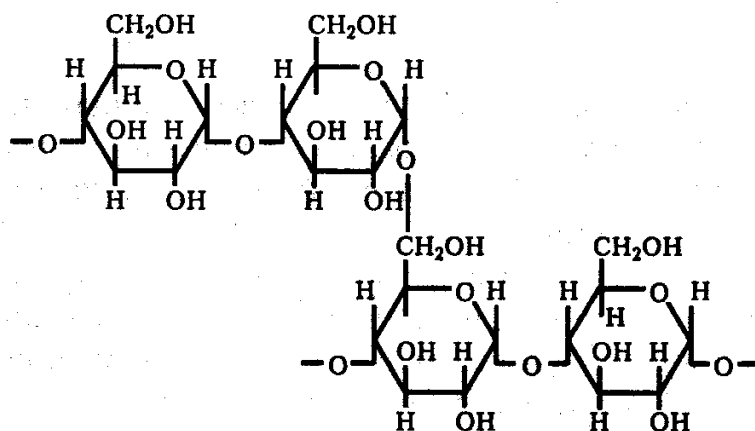
#### 17.2.3.4 Целлюлоза

Полисахариды представляют собой углеводы, содержащие в себе 10 и более связанных элементов сахаридов. Наиболее распространенным элементом полисахаридов является глюкоза, но будучи элементом цепочки она теряет свою сладость и способность вступать в реакцию как редуцирующий сахар. Целлюлоза — это полимер глюкозы, в котором элементы связаны посредством связи  $\beta$ -1,4 (рис. 17.9). Эта характерная связь между элементами глюкозы способствует формированию полимера, на который не действуют тепло, умеренные кислоты, щелочи или ферменты (как правило, используемые при обработке пищевых продуктов и присутствующие в пищеварительном тракте человека).

Считается, что как пищевой ингредиент целлюлоза — это нерастворимая клетчатка, не обладающая калорийностью. В пищевых продуктах характеристиками целлюлозы является отсутствие калорий и ее способность к связыванию воды. Ее «съедобность» и функциональность могут быть улучшены за счет физического распада и уменьшения размера частиц.



Амилоза



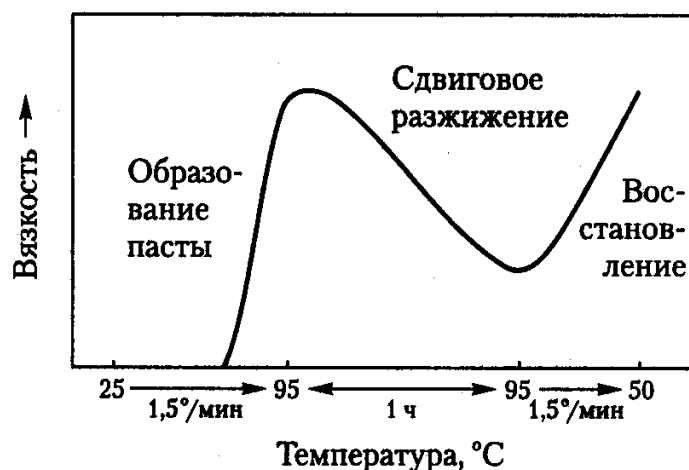
Амилопектин

Рис. 17.10. Структуры связи  $\alpha$ -1,4 между звеньями глюкозы в амилозе и связей  $\alpha$ -1,4 и  $\alpha$ -1,6 — в амилопектине

### 17.2.3.5 Крахмал

Еще одним полимером глюкозы является крахмал, в котором звенья цепочки связаны как  $\alpha$ -1,4, так и  $\alpha$ -1,6 связями. Эти связи формируют легко усваиваемые полимеры, гораздо более функциональные, чем целлюлоза. Форма, в которой элементы глюкозы в основном имеют связь в  $\alpha$ -1,4 положении, носит название амилозы, а форма со связями  $\alpha$ -1,4 и  $\alpha$ -1,6 называется амилопектином (см. рис. 17.10).

В растительном материале крахмал встречается в форме упорядоченных структур, называемых гранулами. Эти гранулы являются своего рода ячейками для хранения крахмала, имеющими кристаллические и аморфные участки. При нагреве в присутствии избытка воды эти гранулы разбухают и в конечном счете разрушаются, высвобождая молекулы амилозы и амилопектина (этот процесс носит название желатинизации). Разбухание сопровождается значительным увеличением вязкости и поглощением воды. Процесс желатинизации зависит от температуры и начинается при  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , не завершаясь до тех пор, пока температура не достигнет  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  [9]. При использовании для управления процессом нагрева выдержки и перемешивания зависимость желатинизации от увеличения вязкости может быть замерена на амилографе. На рис. 17.11 показано увеличение вязкости в нагреваемой системе «крахмал-вода». Результатом первоначальной желатинизации становится образование пасты, по достижении температуры в  $95\text{ }^{\circ}\text{C}$  вязкость становится максимальной. При выдержке и перемешивании при температуре  $95\text{ }^{\circ}\text{C}$  вязкость пасты крахмала будет уменьшаться ввиду сдвигового разжижения. В процессе охлаждения желатинированная



**Рис. 17.11.** Упрощенная амилограмма системы «крахмал-вода», отображающая образование пасты, сдвиговое разжижение и восстановление при охлаждении. По [9]

паста крахмала проявляет признаки увеличения вязкости и способна образовать гель. Не все крахмалы желатинируют одинаково, разные крахмалы (например, кукурузный, пшеничный, картофельный или из тапиоки) будут отличаться разным периодом желатинизации, температурой, вязкостью и свойствами геля.

Главным в формировании вязкости является равномерность желатинизации крахмала, неравномерность этого процесса может стать причиной образования комков. При образовании комков внешние слои поглощают воду и становятся более вязкими, препятствуя поступлению дополнительной воды внутрь, где для дальнейшей желатинизации гранулам необходимо большее количество воды. Для разделения гранул и обеспечения равномерной желатинизации необходимы вода, перемешивание или смешивание с другим разделяющим веществом, например, сахаром или жиром.

При изготовлении готовых соусов и пудингов присутствует достаточное количество как тепла, так и воды, что способствует практически полной желатинизации. Во многих зерновых продуктах количество присутствующего в форме гранул крахмала достаточно высоко, но процесс желатинизации может не достичь своего полного развития ввиду ограниченного количества имеющихся воды или тепла.

Молекулы крахмала, прошедшие желатинизацию, могут в процессе хранения подвергаться процессу дежелатинизации за счет реакции, называемой ретроградацией. За счет водородных связей молекулы крахмала вновь соединяются друг с другом (или, в случае наличия, — с белками), что делает их более прочными. Эта реакция становится причиной черствения выпечки, потери водоудерживающей способности в крахмализованных гелях и формирования крахмала, устойчивого к действию ферментов. Результатами повторного соединения молекул крахмала становятся уплотнение структуры пищевого продукта и ухудшение усваиваемости обычно легко усваиваемого крахмала.

### 17.2.3.6 Модифицированные крахмалы

В своем природном виде крахмалы обеспечивают связывание воды, вязкость, придают пищевым продуктам текстуру. Природные крахмалы имеют некоторые недостатки, связанные с наличием времени и усилий, необходимых для их клейстеризации (набухания).

Тенденция к загустеванию при нагреве может вызвать проблемы с перекачиванием и работой теплообменников. При воздействии кислот и нагрева крахмалы разрушаются и разжижаются, а при хранении происходит реакция ретроградации. Для преодоления этих нежелательных свойств может оказаться полезным использование крахмалов из других растительных источников, поведение которых может быть иным, выбор иного варианта с другим соотношением амилозы и амилопектина или даже селекция новых сортов кукурузы, которые обеспечили бы уникальные свойства крахмала.

Модифицированные крахмалы — это крахмалы, разработанные специально для преодоления некоторых недостатков в функциональных возможностях природного крахмала. Предварительно желатинированный крахмал представляет собой ингредиент крахмала, который был сначала полностью желатинирован, а затем высушен. При добавлении холодной воды этот продукт загустевает без длительного нагрева и перемешивания. Этот тип крахмала является основой для приготовления быстрорастворимых пудингов. Развитие вязкости и формирование геля здесь достигается за счет добавления холодной воды, причем нагрев не нужен.

Другие крахмалы могут быть модифицированы с помощью частичного гидролиза, что позволяет получить более жидкий крахмал (разжижаемый кислотой). Использование этого типа крахмала позволяет избежать проблем с высокой вязкостью, а также упрощает его перекачивание и прохождение через нагревательное оборудование. В других формах модифицированных крахмалов химические группы (например, оксипропил) ковалентно связываются с крахмалом для замедления повторного соединения его молекул в процессе охлаждения и хранения. Такая модификация позволит свести к минимуму эффект ретроградации. Молекулы крахмала также связаны крест-накрест с другими молекулами крахмала, что обеспечивает предотвращение разжижения в процессе кислотного нагрева. Такая связь делает крахмал более устойчивым к воздействию гидролиза (например, в кислом термически обрабатываемом фруктовом соусе).

#### 17.2.3.7 Преобразование крахмала в сахар

Кукурузные сиропы — это группа пищевых ингредиентов, получаемых из кукурузного крахмала. Крахмал разрушается кислотой, теплом и ферментами, цепочки полимеров крахмала становятся более короткими (при этом после завершения реакции конечным продуктом является глюкоза). Результатом различной степени гидролиза становится получение ряда кукурузных сиропов, характеризующихся декстрозным эквивалентом (*DE*). При полном расщеплении до моносахарида глюкозы (называемого также декстрозой) показатель *DE* становится равен 100, тогда как теоретическое значение *DE* крахмала практически равно нулю. При расщеплении крахмалов до более высоких показателей *DE* продукт перенимает свойства, близкие к свойствам глюкозы и мальтозы, например повышенную сладость, высокую гигроскопичность, а также повышенную способность к реакции Майяра. Гидролизаты крахмала со значением *DE* ниже 20 называются мальтодекстринами и по своим свойствам ближе к крахмалам.

Еще одним этапом переработки кукурузных сиропов является обработка кукурузных сиропов с высоким содержанием глюкозы изомеразой глюкозы — фермен-



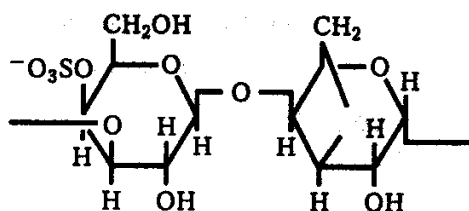


Рис. 17.12. Структура звеньев цепочки каррагинана, типичного резиноподобного пищевого вещества

том, который преобразует глюкозу во фруктозу. Этот продукт носит название кукурузного сиропа с высоким содержанием фруктозы и содержит как фруктозу, так и не преобразованную глюкозу. В таких сиропах уровень фруктозы может быть увеличен до еще более высоких концентраций, придающих общую сладость, схожую с сахарозой. Основным преимуществом кукурузных сиропов с высоким содержанием фруктозы является их большая сладость в сравнении с глюкозно-мальтозными сиропами. Благодаря развитию технологии изготовления кукурузные сиропы с высоким содержанием фруктозы вытеснили ранее применявшуюся сахарозу.

#### 17.2.3.8 Гетерополисахариды и смолистые вещества

Другим классом углеводов являются полимеры, состоящие из разнообразных цепочек моносахаридов, связанных между собой различными связями, и не расщепляемые в процессе пищеварения. Несмотря на то что эти углеводы способны связывать воду, формировать значительную вязкость и/или гели, они все же относительно химически инертны. Некоторые из гетерополисахаридов имеют отрицательный заряд и способны связывать положительно заряженные компоненты пищевых продуктов. Примерами гетерополисахаридов такого типа являются каррагинан, гуаровая смола, пектин, альгинат, смола из плодов рожкового дерева, ксантан, модифицированная целлюлоза и β-глюкан (рис. 17.12). С точки зрения функциональных возможностей эти углеводы являются стабилизаторами и элементами, связывающими воду. Из-за различий подгрупп сахаров и связей эти полимеры отличаются друг от друга реологическими свойствами, способностью к гелеобразованию, а также поведением под воздействием тепла и pH.

Одной из сложностей работы с такими резиноподобными веществами как сухими ингредиентами является их быстрое загустевание в воде. Таким образом, полное гидратирование и диспергирование этих порошкообразных веществ становится достаточно сложным. Поскольку внешняя сторона звена становится плотной, ее внутренней стороне может не хватить воды для гидратирования. В результате наблюдается неполнота диспергирования, а внешний вид напоминает «рыбьи глазки», характерные для негидратированных резиноподобных веществ.

## 17.2.4 Белки

Белки в различной концентрации присутствуют в пищевых продуктах растительного и животного происхождения (табл. 17.2). Что касается реакций белков животного происхождения, то здесь возможны некоторые обобщения, но в процессе термообра-

Таблица 17.2. Содержание белков в некоторых пищевых продуктах

Пищевой продукт	Белок %
Персики	1
Майонез	1
Бананы	1
Картофель	2
Грибы	2
Брокколи	3
Шпинат	3
Цельное молоко	3,3
Обезжиренное молоко	3,4
Вареный канадский рис	4
Кукурузные хлопья (Kellog's)	8
Грейпнат (зерновой продукт, готовый к употреблению)	12
Сырое яйцо	13
Острый перец (пепперони)	21
Голубой сыр	21
Чеддер	25
Лососина	25
Жареный цыпленок	50
Индейка	63

Примечание: Массовый процент (во влажном состоянии) в съедобной части.

ботки белки ведут себя совершенно по-разному. Если содержание белков в пищевых продуктах по-прежнему значимо для пищевой ценности продуктов, то в последнее время гораздо большее внимание уделяется той функции, которую белки играют в формировании структуры, водоудерживающей способности, в эмульгировании, геле- и пенообразовании.

#### 17.2.4.1 Структура и функции

Белки представляют собой полимеры, состоящие из аминокислот, связанных одинаковым типом амидной связи, называемой пептидной. Уникальные свойства белков зависят от длины их цепи и набора аминокислот, формирующих данную последовательность. Несмотря на то что состав аминокислот различен, количество азота в белках пищевых продуктов до некоторой степени постоянно и составляет около 16%. Это позволяет рассчитать количество содержащегося в продукте белка на основании анализа содержания азота. После определения количества азота для расчета предполагаемой концентрации белка полученный результат умножается на коэффициент 6,25. В зависимости от источника белка этот коэффициент может составлять от 6,38 (для молочных продуктов) до 5,7 (для пшеницы).

Аминокислоты различаются по своей способности вступать в реакции, полярности, заряду и функциональным группам. Свойства белков совпадают с некоторыми

из свойств аминокислоты. В природном состоянии белки формируют очень специфичную трехмерную структуру. Эта единственная в своем роде форма является ключом к функциям белков в их природном состоянии, и именно она оказывает решающее воздействие на поведение белка в пищевом продукте.

Пищевые белки обладают разнообразными функциями, зависящими от аминокислотного состава, который в свою очередь зависит от источника происхождения белка. Некоторые белки при перемешивании способны образовывать пену. Примером процесса перемешивания с воздухом, в результате которого образуется пена, являются протеины яичного белка. При перемешивании с водой белки пшеничной муки (глиадин и глютеин) образуют клейковину, которая представляет собой растяжимую, когезионную и эластичную структуру, являющуюся основой текстуры изготовленных из теста продуктов.

Некоторые типы белков способны к гелеобразованию, поскольку обладают свойствами полимеров, за счет которых формируется молекулярная сеть и удерживается вода. Соответствующее воздействие на белки молочной сыворотки, казеина и сои, желатин способно образовать такие продукты, как йогурт, прессованный творог, желатиновые десерты и тофу. Другие белки известны своей способностью к эмульгированию жиров и стабилизации эмульсий [21]. Пищевые белки используются также в качестве загустителей, несмотря на то что на эту их способность часто влияет тепло и уровень pH.

#### *17.2.4.2 Денатурирование белков под воздействием тепла*

При изменении трехмерной структуры свойства белка необратимо меняются. Существует целый ряд факторов, становящихся причиной денатурации, но при обработке пищевых продуктов именно тепло является наиболее широко распространенным денатурирующим фактором. Из числа других денатурирующих факторов следует упомянуть о перемешивании, растворителях и солях. Трехмерная структура белков под воздействием тепла меняется, поскольку связи и силы, удерживающие пространственную структуру полимера, разрываются.

Водородные и дисульфидные связи чувствительны к воздействию тепла, а результатом их разрыва становится денатурирование некоторых пищевых белков. Функции белков при денатурировании значительно меняются из-за изменения растворимости и способности вступать в реакции вследствие задействования активной стороны молекулы белка или из-за увеличения взаимодействий «белок-белок». Один из наиболее чувствительных к воздействию тепла протеинов, а именно белок яйца, денатурирует при температуре в 65 °C и образует гель. На некоторые другие белки, например, на встречающиеся в молоке казеины, тепло воздействия не оказывает, и они в обычных условиях обработки не денатурируют. При термообработке пищевых продуктов такие протеины, как, например, белок яйца, яичный желток, пшеница, мясо, сыворотка и соя, денатурируют под воздействием тепла, результатом чего становится загустевание, потеря растворимости и формирование таких структур, как гели или твердая текстура зерновых продуктов. При воздействии тепла коллаген (соединительная ткань в мышцах) преобразуется в желатин, что означает солюбилизацию и тендеризацию мяса и образование структуры белка, способной к образованию желатинизированных гелей.

### 17.2.4.3 Влияние pH

Белки представляют собой полярные макромолекулы. На заряды цепочек со стороны аминокислот оказывает воздействие pH. При более высоком уровне pH белки заряжены отрицательно, тогда как при низком уровне pH они имеют положительный заряд. На некотором промежуточном уровне pH, называемом изоэлектрической точкой, молекула белка электронейтральна.

Это может привести к тому, что молекулы белка будут притягиваться друг к другу, результатом чего станет потеря растворимости, коагуляция и осаждение. Когда белки молока подкисляются до pH 4,6, белки казеина выпадают из раствора, в то время как белки молочной сыворотки продолжают оставаться в растворе. Для осаждения белков молочной сыворотки необходимо сочетание теплового денатурирования и pH от 4 до 5. При изготовлении соевых заменителей мяса щелочерастворимые белки сои сквозь отверстие прокачиваются в кислую ванну, где формируются нити осажденных белков, которые затем уплотняются для имитации мясных волокон.

### 17.2.4.4 Влияние солей

Соли способны воздействовать на заряд белков и изменять их растворимость. Соль растворяет белки мышечного волокна мяса. В процессе приготовления фаршевых эмульсий мясные белки следует растворять посредством добавления соли, что способствует эмульгации жира и при варке препятствует отделению эмульсии. Соль влияет и на функции белков пшеницы при выпечке, а результатом добавления соли становится более крутое тесто. Соли нейтрализуют изменение заряда белков, позволяя добиться их лучшего взаимодействия и способствуя формированию клейковины.

### 17.2.4.5 Ферменты

Ферменты представляют собой белки, катализирующие химические реакции. Пищевые продукты, естественно, содержат много ферментов, определяющих последовательность химических изменений. В некоторых случаях природные ферменты оказывают существенное влияние на формирование конечного вкуса и текстуры продуктов (например, фруктов и овощей). Кроме того, роль ферментов важна при тендеризации мяса (придании ему мягкой консистенции), созревании сыра и преобразовании крахмала в способный к брожению сахар. Ферменты несут ответственность за ухудшение качества замороженных и небланшированных овощей, потемнение срезов яблок или сырого картофеля, прогоркание жиров молока и зерна, а также за превращение перезревших фруктов в кашеобразную массу.

Ферменты инактивируются (денатурируются) в ходе тепловой обработки. Под воздействием тепла большинство ферментов изменяют свои естественные свойства и при температурах от 50 до 90 °C теряют каталитические способности. При обработке свежих продуктов, когда термическая инактивация не приемлема, ферменты могут подавляться за счет ограничения количества субстрата, изменения уровня pH или добавления соли. Окислительные ферменты (например, полифенолоксидаза) вызывают ферментативное потемнение и могут быть инактивированы посредством ограничения доступа кислорода. Эффективным средством снижения уровня окис-

лительного ферментного потемнения в свежих овощах и фруктах является аскорбиновая кислота.

Помимо всего сказанного, ферменты играют ключевую роль и при обработке пищевых продуктов, куда они добавляются в качестве ингредиентов. В качестве примеров могут быть приведены ренин, добавляемый в молоко для получения сыра, амилаза, добавляемая в тесто для получения из крахмала способного к брожению сахара, для расщепления белка и крахмала в пивоварении добавляется ячменный солод. Источником ферментов в пищевых продуктах также могут быть дрожжи, плесневые грибы и бактерии. Независимо от того, добавляются ли они намеренно для ускорения процесса ферментации или являются последствием заражения, микроорганизмы способны внести большой вклад в активность ферментов в пищевых продуктах.

## 17.2.5 Жиры

Упрощенно жиры (липиды) можно считать классом соединений, которые поддаются растворению в органических растворителях. При комнатных температурах жиры являются твердыми, а масла — жидкими. На практике же липиды, жиры и масла в пищевых системах означают одно и то же<sup>1</sup>. Жир обеспечивает пищевой продукт некоторыми единственными в своем роде функциональными возможностями, которые не могут быть ни заменены, ни дублированы другими компонентами. Кроме того, жирам следует уделять внимание из-за большой их калорийности (9 кал/г), и рационы питания, включающие значительные количества жиров, зачастую ассоциируются с развитием некоторых хронических заболеваний. Кроме того, жиры могут стать причиной изменения вкуса (прогоркания) пищевых продуктов. Содержание жиров в различных пищевых продуктах приведено в табл. 17.3.

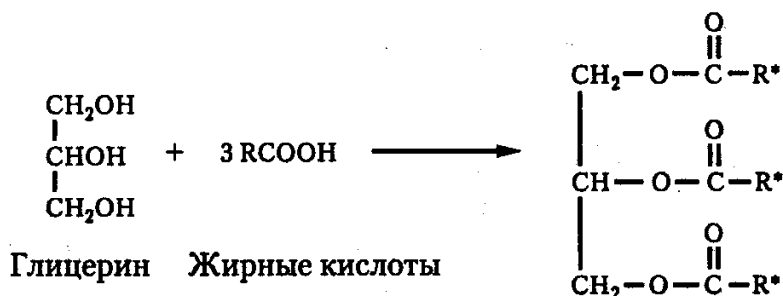
Для сведения к минимуму количества жиров в природных и рецептурных пищевых продуктах существуют свои причины, и при разработке и изготовлении новых продуктов этому уделяется большое внимание. Как правило, осложнение при этом вызывает не само удаление жира, а связанные с ним изменения в качественных свойствах продукта. Упрощенный подход к снижению содержания жира без его компенсации в рецептуре и технологии обычно не приводит к получению продукта приемлемого качества.

### 17.2.5.1 Химическое строение

В пищевых продуктах липиды чаще всего встречаются в форме триглицеридов. Как показано на рис. 17.13, молекула триглицерида включает остатки трех жирных кислот<sup>2</sup>, связанных с молекулой глицерина через эфирные связи. Другими, менее распространенными формами липидов в пищевых продуктах, являются жирорастворимые витамины (А, D, Е и К), жирорастворимые пигменты (например, хлорофилл и каротиноиды, моно- и диглицериды, холестерин, воски и фосфолипиды).

<sup>1</sup> В состав твердых жиров входят остатки предельных жирных кислот, в состав масел — остатки непредельных (ненасыщенных) жирных кислот. — *Прим. науч. ред*

<sup>2</sup> Триглицериды могут иметь остатки и ненасыщенных кислот — это масла, мягкие жиры. — *Прим. науч. ред.*



**Рис. 17.13.** Образование триглицерида из глицерина и трех жирных кислот.  
 $\text{R}^*$  обозначает любую жирную кислоту

**Таблица 17.3.** Содержание жиров в некоторых пищевых продуктах

Пищевой продукт	Содержание жира %
Снятое молоко	0,2
Яблоко	0,4
Вареные макароны	0,7
Вареная треска	1
Томатный суп	2
Цельное молоко	3
Простой йогурт	3
Низкокалорийная салатная заправка из уксуса и растительного масла	6
Вареный лосось	8
Жареная индейка	9
Жареный цыпленок	17
Сникерс	22
Обычная «французская» заправка для салата	41
Острый перец (пепперони)	44
Маргарин, кукуруза	80
Сливочное масло	81
Растительное масло «Канола»	100

Жирные кислоты триглицеридов различаются по длине цепей и количеству двойных связей. Различия в способности вступать в химические реакции и в функциональных возможностях жиров в значительной степени зависят от свойств конкретной жирной кислоты. Некоторые из наиболее часто встречающихся жирных кислот и точки их плавления приведены в табл. 17.4. Жирные кислоты с более длинными цепочками делают триглицериды при комнатных температурах более твердыми. Более короткие цепи, а также большее количество двойных связей в жирной кислоте означают, что данный жир при комнатной температуре будет более жидким.

Длина цепочек жирных кислот зависит от источника происхождения жира, тогда как количество двойных связей (ненасыщенность) зависит как от источника проис-

Таблица 17.4. Температура плавления некоторых жирных кислот

Жирная кислота	Температура плавления (°C)
Капроновая кислота (C6)	-7,9
Каприловая кислота (C8)	-3,9
Каприновая (декановая) кислота (C10)	16,3
Лауриновая (додекановая) кислота (C12)	44,0
Миристиновая кислота (C14)	54,4
Пальмитиновая (гексадекановая) кислота (C16)	62,9
Стеариновая (октадекановая) кислота (C18)	69,6
Олеиновая кислота (C18:1)	13,4
Линолевая кислота (C18:2)	-5,0
Арахидоновая кислота (C20:4)	-49,5

По [1].

хождения жира, так и от процесса гидрирования. Животные жиры (лярд, сало, сливочное масло) имеют тенденцию к меньшей ненасыщенности и поэтому они более твердые. Исключениями здесь являются рыбий жир, в котором встречаются жирные кислоты с длинными цепочками и множеством двойных связей. Растительные источники жиров обладают большей ненасыщенностью и поэтому при комнатных температурах они чаще жидкие, чем твердые. Исключение — кокосовое и косточковое пальмовое масло (так называемые «тропические жиры»), в состав которых входят в значительной степени насыщенные жирные кислоты с цепочками короткой и средней длины, что делает эти жиры твердыми при комнатной температуре.

Гидрогенизация заключается в добавлении в масла катализаторов и водорода, преобразующих двойные связи жирных кислот в одинарные (кратные связи в насыщенные). Результатом гидрогенизации является снижение числа двойных связей и повышение температуры плавления. Гидрогенизированные масла обладают меньшей химической реактивностью, чем масла, имеющие более высокий уровень ненасыщенности. Так, маргарин представляет собой твердое тело, а исходный материал, из которого он изготавливается, — жидкость. Мягкость маргарина поддается управлению за счет уровня гидрогенизации.

Побочной стороной гидрогенизации является преобразование природной формы двойных связей «*cis*» в форму «*trans*» (рис. 17.14). Продолжая вносить свой вклад в ненасыщенность, двойная связь «*trans*» содействует также повышению точки плавления, то есть образованию более твердого жира. Формы «*trans*» являются побочным продуктом процесса гидрогенизации, причем они вызывают некоторые вопросы относительно их метаболизма в организме человека.

### 17.2.5.2 Функции жиров

Жиры и масла в пищевых продуктах представляют собой multifunctional компоненты, что усложняет задачу снижения содержания их уровня или полного удаления. Жиры являются средством теплопередачи и используются при тепловой

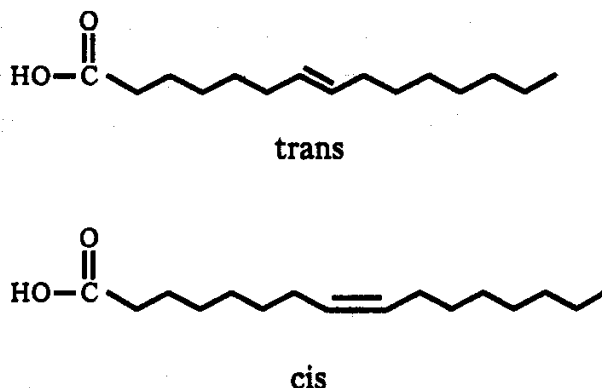


Рис. 17.14. Структуры жирных кислот форм «cis» и «trans»

обработке большого количества продуктов как в производственных, так и бытовых условиях. Не содержащих жира заменителей масел для жарки не существует, хотя поглощение жира в процессе жарки может регулироваться за счет различных факторов. Жиры являются «смазкой», предотвращающей прилипание и позволяющей отделять продукт от поверхностей.

Жиры обеспечивают такие органолептические свойства продукта, как сочность и вкус. Вкусовые вещества в пищевых продуктах зачастую содержатся в липидной части пищевых продуктов. Жиры не только улавливают и передают их, но и сами способны расщепляться в процессе нагрева, обеспечивая при этом желаемый вкус. Так, вкус различных сортов мяса частично проявляется за счет расщепления жира в процессе приготовления.

В пищевых продуктах, основой которых являются зерновые, жиры вносят свой вклад в мягкость продукта, «охватывая» при смешивании частицы муки. Это сводит к минимуму взаимодействие воды с белками муки и ограничивает взаимодействие белков друг с другом. В результате образуется меньшее количество клейковины и продукт получается более мягким. Благодаря своей низкой вязкости масла более эффективны при размягчении продуктов, чем твердые жиры. Исторически сложилось так, что функция размягчения в выпечке получила название «*shortness*», и такие жиры стали называться шортенингами (жирами, добавляемыми в тесто для повышения его рассыпчатости). Кроме этого, служа барьером между слоями клейковины, в кондитерских изделиях жиры обеспечивают образование хлопьев.

Жиры участвуют также в обеспечении непрозрачности или белизны пищевых продуктов (особенно при эмульгации). Например, обезжиренное молоко отличается по степени белизны от цельного с 3,25%-ным содержанием жира, что объясняется преломлением света частицами жира. Обезжиренные заправки для салата по своей прозрачности могут отличаться от заправок, содержащих жир.

Жиры могут использоваться в пищевых продуктах в твердом, жидком или «полутвердом» виде. Полутвердые жиры называются пластичными, а пластичность зависит от температуры и типа смеси жиров с разными источниками происхождения. В процессе преобразования жидких форм в твердые триглицериды образуются различные типы кристаллических структур, которые в зависимости от хода процесса охлаждения могут иметь различные характеристики плавления. В ходе процесса, называемого переэтерификацией, жирные кислоты высвобождаются из структуры



триглицерида, и затем повторно связываются (иногда в другой позиции). Результатом этого процесса становится перераспределение жирных кислот в триглицеридах, что используется для улучшения пластичности исходного жира.

### 17.2.5.3 Окисление липидов

Результатом окисления жирных кислот становится появление нежелательных вкуса и запаха, что может являться показателем неприемлемого качества продукта. Окисление липидов и потеря вкусовых качеств является, вероятно, наиболее часто встречающейся причиной порчи пищевых продуктов, помимо заражения микроорганизмами. Сроки годности при хранении сухих завтраков (мюслей), замороженного мяса, картофельных чипсов и растительных масел ограничены степенью их окисления. Помимо формирования вкуса, окисление жиров может привести к потере чрезвычайно важных жирных кислот, необходимых для человека, постепенному исчезновению пигментов, разрушению растворимых в жирах витаминов и формированию потенциально опасных соединений, источником которых является окисленный жир [6].

Потенциальную способность к окислению липидов определяет количество двойных связей в жирной кислоте или в исходном жире. Любое масло, характеризующееся высоким показателем ненасыщенности, следует считать подверженным разложению. Показательным примером очень ненасыщенного масла является рыбий жир, который в любой пищевой системе очень нестабилен.

В ходе реакции окисления образуются химически высоко активные свободные радикалы. Процесс окисления в пищевых продуктах имеет некоторый начальный период, на протяжении которого реакция может показаться медленной или вовсе несуществующей. С течением времени скорость протекания реакции возрастает, и на этом этапе все попытки ее остановить или замедлить бесполезны. Происходит вовлечение в реакцию кислорода, что приводит к образованию перекисей и гидроперекисей. Следующим этапом протекания реакции становится расщепление жирной кислоты на соединения с меньшей молекулярной массой (например, альдегиды и кислоты). Эти соединения сами могут обладать сильным вкусом или вступать в реакции, в результате которых возникают проблемы со вкусовыми качествами продукта. Образовавшиеся продукты окисления способны к полимеризации и поликонденсации, что приводит к образованию соединений, обладающих большой молекулярной массой. Масло становится более вязким и обесцвеченным. На этом этапе вкус, как правило, настолько неприятен, что продукт становится несъедобным.

Для подавления окисления липидов используется множество средств. Снизить склонность к окислению можно с помощью применения более насыщенных жиров и более высокой степени гидрогенизации ненасыщенных жиров. Несмотря на то что использование ненасыщенных жиров желательно в целях сохранения здоровья, в целом проблему окисления жиров следует решать за счет применения других методов, например, выбора упаковки, соответствующих условий хранения, использования антиокислителей и т. д. Окисление липидов с учетом исключений из общего правила в первую очередь может быть обусловлено условиями хранения продукта, в

меньшей степени — воздействием тепла. Вместе с тем температура тоже имеет значение, и для хранения чувствительных к окислению продуктов рекомендуются низкие, а не высокие температуры. Окислению липидов способствует и свет, поэтому в качестве профилактических мер целесообразно применение непрозрачной или цветной упаковки, а также защита от видимого и ультрафиолетового света. Смешивание даже небольшого количества окисленного масла со свежим дает возможность «перескочить» через значительную часть начального периода реакции и таким образом ее ускорить. Присутствие перекисей и свободных радикалов в старом масле ускоряют образование привкусов.

Одним из реагентов, в значительной степени содействующим протеканию реакции, является кислород. Любые меры, способствующие удалению из пищевого продукта воздуха или кислорода, помогают замедлить ход реакции. Природные свойства большинства пищевых продуктов не позволят полностью удалить из них воздух, но вакуумная упаковка (для жареного арахиса), продувка азотом (для картофельных чипсов) и использование непроницаемой для кислорода упаковки (прокладка из фольги для некоторых готовых к употреблению продуктов) могут способствовать подавлению реакции окисления. Влияние воды на процесс окисления липидов различно, поскольку в сухих продуктах (например, порошках или хлопьях) дальнейшее снижение содержания влаги будет способствовать процессу окисления. При других обстоятельствах увеличение содержания влаги или ее активности  $a_w$  способно повысить степень окисления (обобщенное воздействие  $a_w$  на процесс окисления липидов см. на рис. 17.3).

Катализаторами окисления липидов являются ионы металла (например, железа или меди). Присутствие этих металлов в технологическом оборудовании, воде, маслах или других пищевых ингредиентах следует рассматривать как наличие «предокислителя». В качестве хелатных соединений или соединений, связывающих ионы металла и разрушающих их каталитическую активность, используются некоторые антиокислители, например, лимонная кислота. Замедлить скорость протекания реакции способны и природные антиокислители — например, витамин Е или  $\beta$ -каротин, а также добавление синтетических антиокислителей (например, трибутилгидроквинона (ТВНҚ), бутилгидроксианизола (ВНА) или бутилгидрокситолуена (ВНТ)). Сила этих антиокислителей ограничена, причем применять их можно лишь в незначительных количествах. Как правило, для предотвращения окисления липидов в продуктах, содержащих ненасыщенные жиры, следует использовать сочетание профилактических мер, но даже в случае их применения сроки годности продуктов при хранении будут ограничены вследствие реакции окисления.

#### 17.2.5.4 Масла, используемые для жарки

Используемые для жарки масла являются средством теплопередачи, источником вкуса и, в конце концов, становятся составной частью жареного продукта. В процессе жарки масла могут быть в различной степени насыщенными или ненасыщенными, а высокие температуры, возникающие в процессе жарки, становятся причиной разрушения триглицеридов. Вызванный нагревом гидролиз триглицеридов создает

свободные жирные кислоты, которые могут обладать характерным вкусом, способностью к дальнейшему химическому расщеплению и образованию обладающего едким запахом акролеина и дыма, нежелательного при жарке.

Жарка происходит преимущественно при температуре 175 °С, поскольку при более низких температурах возникает тенденция к избыточному поглощению масла пищевым продуктом, а нагрев масла до более высоких температур может вызвать быстрое его разрушение. Даже при нормальных температурах жарки происходит расщепление триглицеридов, приводящее к образованию дыма, потемнения, большой вязкости (ввиду полимеризации) и различных привкусов. В большинстве процессов жарки осуществляется регулярное обновление масла взамен поглощенного продуктом. Иногда старое масло бывает некачественным, и его приходится выбрасывать, поскольку присутствие такого масла в жареном продукте может стать причиной появления нежелательных привкусов и сокращения срока хранения.

Повышение вкусовых качеств продукта в процессе жарки становится результатом воздействия высоких температур, вызывающих реакцию Майяра. Само масло расщепляется на вкусовые компоненты, которые переходят в жарящийся продукт. Хорошо известно, что при жарке ни свежее масло, ни затемненное или полимеризованное масло не способны придать продукту оптимальный вкус — наилучших вкусовых качеств можно добиться за счет добавления свежего масла к уже используемому.

## 17.2.6 Пигменты и красители

Цвет пищевых продуктов является ключевым фактором их приемлемости. Если потребитель считает, что у продукта недостаточная или неустойчивая окраска, то это дает ему основания предполагать плохое качество приготовления, порчу, низкое качество ингредиентов. Цвет пищевого продукта в некоторых случаях является результатом обработки (в случае выпечных изделий), а однородность цвета ассоциируется с надлежащим управлением технологическим процессом. В других случаях способ приготовления может стать причиной разрушения цвета продукта (например, цвет консервированных зеленых бобов), и сведение к минимуму воздействия процесса обработки на цвет продукта в этих обстоятельствах становится одним из факторов совершенствования технологии. Кроме этого, на цвет пищевых продуктов, создаваемых по рецептуре, воздействуют и выступающие в качестве ингредиентов красители (например, добавляемый жженый сахар или «желтый № 5») или ингредиенты, реакция которых может способствовать образованию цвета (например, добавление глюкозы для улучшения реакции Майяра). Пример химической формулы красителя приведен на рис. 17.15.

### 17.2.6.1 Жирорастворимые красители

Природные красители чаще всего имеют растительное происхождение. Хлорофилл — жирорастворимый зеленый пигмент растений — химически нестабилен и имеет сложную структуру. Двумя признаками, влияющими на его стабильность, являются ион магния и связанная жирная кислота, обеспечивающая растворимость в

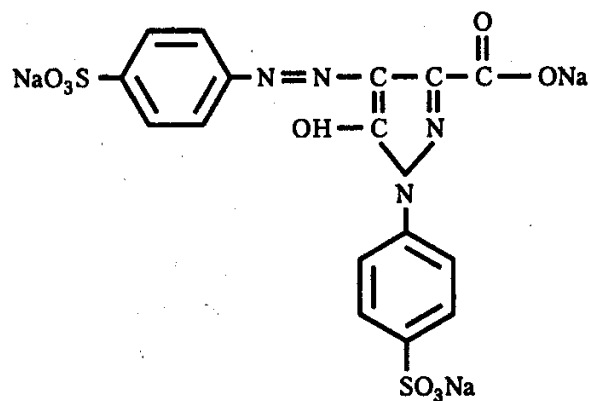


Рис. 17.15. Формула пищевого красителя («желтый № 5»)

жирах. При наличии кислоты и тепла хлорофилл превращается в феофитин (ионы магния заменяются ионами водорода), имеющий оливково-зеленый цвет. Условия легкой кислотности и продолжительного нагрева, характерные для процесса консервирования овощей, разрушительны для хлорофилла, поэтому после термической обработки в овощах остается лишь небольшая часть хлорофилла. Несмотря на то что некоторые внутренние обшивки банок испускают ионы металла, которые частично восстанавливают зеленый цвет; эта потеря первоначального цвета необратима. Причиной повышения растворимости в воде может стать вызванное условиями обработки расщепление жирной кислоты — фитола.

Каротиноиды представляют собой растворимые в жирах пигменты оранжевого цвета, встречающиеся в моркови, помидорах, ананасах, апельсинах, кукурузе и других растениях. Животные каротиноидов не вырабатывают, а выделяют из потребляемой пищи, откладывая их в жировых тканях. Желтый цвет жира цыпленка, желтка яйца и молочных жиров объясняется наличием каротиноидов в пище животных. С недавних пор каротиноиды привлекли к себе внимание как пищевые компоненты, способные подавлять некоторые хронические заболевания, в частности, рак.

В пищевых продуктах встречается множество каротиноидов, наиболее распространенными из которых являются  $\beta$ - и  $\alpha$ -каротины, ликопин, лютеин и кантаксантин. Эти красители очень стабильны при обработке, хотя ввиду изомеризации природных форм «транс-» в формы «цис-» возможно незначительное изменение цвета<sup>1</sup>. Как и реагирующие с кислородом липиды с двойными связями, каротиноиды также чувствительны к окислению (рис. 17.16), поэтому могут оказаться нестабильными в сухих продуктах, подвергаемых воздействию воздуха. В отличие от других растительных пигментов каротиноиды с успехом используются в качестве пищевых красителей. Оранжеватый цвет сыра «чеддер» и масла объясняется добавлением каротиноидов, источником которых являются бобы аннато. Существуют и воднодисперсионные виды красителей, поэтому жирорастворимость не является ограничивающим фактором. Некоторые каротиноиды (например,  $\beta$ -каротин) являются провитамином А, что делает возможным их добавление как для окрашивания, так и для повышения пищевой ценности продукта.

<sup>1</sup> Это происходит потому, что в растворе любой углевод существует в виде пяти оптических изомеров, отличающихся и цис-, трансизомерией, и формой связи гликозидного гидроксила. — *Прим. науч. ред.*

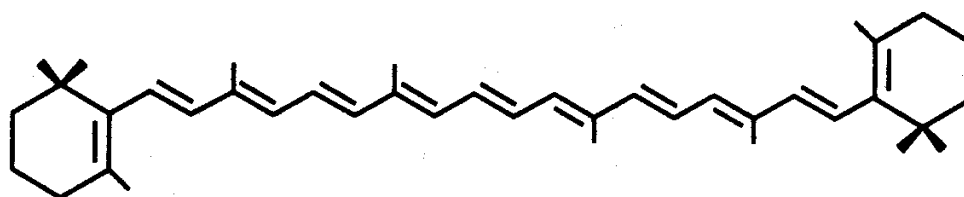


Рис. 17.16. Схема строения природного красителя ( $\beta$ -каротина)

#### 17.2.6.2 Водорастворимые красители

Красные и синие красители в таких продуктах, как ягоды, яблоки, виноград, краснокочанная капуста и вишня, относятся к группе антоцианинов. Эти пигменты являются водорастворимыми и значительно изменяют свой цвет при изменении уровня pH. В щелочной среде антоцианины (имеющие, как правило, красный цвет) становятся более бледными и приобретают синий или серый оттенок. Кроме того, эти пигменты чувствительны к воздействию ионов металла и в присутствии ионов алюминия, олова или железа меняют свой цвет. Красители, присутствующие в свекле, обладают схожими характеристиками, но источником их происхождения являются соединения, называемые беталаинами. Экстракты, получаемые из кожуры винограда, свеклы или другого растительного сырья, используются в качестве концентратов красителей для других пищевых продуктов. Они несколько нестабильны при продолжительном нагреве; при хранении могут обесцвечиваться под воздействием окисления и менять цвет при изменении уровня pH.

Родственной группой являются антоксантины, представляющие собой белые пигменты, встречающиеся в пшеничной муке, картофеле и репчатом луке. Цвет этих пигментов, который при обычных обстоятельствах почти незаметен, проявляется в щелочной среде, где антоксантины под воздействием щелочных ингредиентов приобретают желтый цвет. Эти пигменты дают желтый цвет в присутствии алюминия, а в присутствии железа они могут давать черный или коричневый цвет.

#### 17.2.6.3 Пигменты мяса

Цвет мясных продуктов объясняется наличием миоглобина, который в сыром мясе может быть ярко-красного или коричневого цвета (в зависимости от подверженности продукта воздействию кислорода). Существенными характеристиками молекул миоглобина является присутствие в них железа, а также их связанность с белком. В процессе приготовления мяса его красновато-оранжевый цвет меняется на коричневый. Этот пигмент, называемый гемихромом (гемоглобином), необратимо формируется из молекулы миоглобина и является результатом денатурирования белка. Поскольку коричневый цвет зачастую является признаком готовности мяса, гемихром получил название «пигмента жареного мяса». К консервированным мясным продуктам (ветчине, колбасе, бекону и сосискам) в процессе консервирования добавляется нитрит, который, вступая в реакцию с миоглобином, дает розовый цвет. При нагреве этот цвет стабилизируется и называется «нитрозогемихром» (нитрозомиоглобином). Он не претерпевает изменений в процессе дальнейшего нагрева, и поэтому повторный разогрев ветчины и сосисок не ведет к неизбежной смене цвета, а «цвет жареного мяса» не проявляется.

#### 17.2.6.4 Красители как пищевые ингредиенты

Ряд красителей используется в качестве пищевых ингредиентов. Некоторые из красителей имеют природное происхождение, и о них мы уже говорили выше. Жженный сахар (карамель) образуется в результате термической реакции редуцирующих сахаров и дает различные оттенки коричневого цвета и вкус карамели. «Карамельный колер» является результатом расщепления сахара или реакции Майяра и используется для приготовления черного хлеба или напитков типа кока-колы. Кошениль или кармин представляют собой красные пигменты, экстрагируемые из насекомых. Диоксид титана — белый пигмент, используемый для отбеливания и глазирования.

Искусственные красители, иногда называемые сертифицированными, растворимы в воде. Кроме того, в нерастворимой форме, называемой «красочными лаками», они могут быть связаны с солями алюминия. Существует пять красящих веществ, одобренных для применения в жидком виде. Им присвоены названия и номера, например, «желтый № 5». В США красители испытываются и сертифицируются для их безопасного использования в пищевых продуктах Управлением по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов (FDA). По сравнению с природными, искусственные красители являются более сильнодействующими, стабильными и более стойкими в процессе обработки и хранения. Окраска «красочным лаком» происходит скорее за счет дисперсии, чем за счет разжижения. «Красочные лаки» используются для порошков и других сухих смесей, где свойство водорастворимости не обязательно.

### 17.2.7 Витамины и минеральные вещества

Постоянную озабоченность в процессе обработки пищевых продуктов вызывает снижение их пищевой ценности, причиной которого становится потеря витаминов и минеральных веществ. Подобные потери могут происходить на различных этапах обработки продукта, однако зачастую упускаются из виду потери, случающиеся в процессе промывки и фракционирования свежего (необработанного) пищевого продукта. Например, при помоле используемых для изготовления хлопьев злаков происходит удаление отрубей и ростков, в которых в основном и сконцентрированы витамины и минеральные вещества. Если эти компоненты не используются в пищу или же не рекомбинируются для изготовления цельной пшеничной муки, происходит потеря питательных веществ.

Такая ситуация привела к необходимости принятия директив, касающихся обогащения муки и добавления в нее ниацина, рибофлавина и железа. Эти добавки компенсируют потерю питательных веществ в том случае, если в конечном пищевом продукте не используются отруби и ростки. К отделению витаминов от съедобной части пищевого продукта могут привести также очистка от кожуры и мойка.

Многие витамины и минеральные вещества растворимы в воде. В случае потери воды при промывке или ее смешения с варочной жидкостью возможно выщелачивание питательных веществ. Минеральные вещества не являются термочувствительными, и в процессе обработки (за исключением фракционирования выщелачиванием), как правило, не утрачиваются. Определенные компоненты пищевых продуктов,

например, клетчатка и фитаты, способны связывать минеральные вещества и уменьшать пищевую ценность продукта, предотвращая вовлечение таких веществ в пищеварительный процесс.

Еще одним механизмом, являющимся причиной утраты некоторых витаминов (но не минеральных веществ), является химическое разрушение. Наиболее восприимчивыми к воздействию тепла являются витамин С и тиамин (витамин В<sub>1</sub>). Химическое разрушение может стать причиной заметной утраты этих витаминов в процессе выпечки или консервирования. Утрата растворимых в жире витаминов А и Е возможна в процессе окисления липидов.

Рибофлавин и витамин А известны как вещества, чувствительные к воздействию света и могущие подвергнуться химическому разрушению. Например, молоко в прозрачной таре, подвергающееся воздействию света, в процессе хранения будет утрачивать значительное количество рибофлавина.

## 17.2.8 Вкус и аромат

Вкус, как и цвет, является существенным компонентом качества продукта. Вкус может быть сформирован в процессе обработки продукта и быть желательным или нежелательным. За редким исключением (например, в тех случаях, когда речь идет об отборных винах и определенных сырах) вкус пищевого продукта со временем ухудшается и зачастую становится причиной истечения срока его годности при хранении. Существует возможность введения в продукт вкусовых добавок, которые могут быть как натуральными, так и искусственными.

### 17.2.8.1 Вкус

Вкус может быть соленым, сладким, кислым и горьким. Источник соленого вкуса — исключительно хлорид натрия. Другие комбинации ионов, несмотря на придание продукту некоторой солености, сами по себе не способны придать ему достаточно соленый вкус. Сладкий вкус может быть обеспечен различными химическими веществами, например, сахарами или группой соединений, называемой интенсивными заменителями сахара. Они обладают некоторыми общими химическими свойствами, но не являются родственными в том, что касается их общей структуры. Сладость, воспринимаемая на молекулярной основе, различна в зависимости от заменителя сахара и той пищевой системы, в которой он используется. Кислый вкус создается прежде всего за счет уровня рН, причем кислотные пищевые продукты воспринимаются как более кислые. Горечь является ощущением, создаваемым несколькими химическими веществами, (например, определенными пептидами и алкалоидами типа кофеина). Резкие впечатления от кислого или горького вкуса пищевых продуктов могут быть смягчены за счет использования заменителей сахара.

Другими вкусовыми ощущениями являются, например, жжение от перца (оно вызывается капсаицином или пиперином) и ощущение холода (от ментола). Существует также и другая группа химикатов, известная как «усилители вкуса». Не внося собственного вклада во вкус пищевого продукта, они способствуют выделению наилучших вкусовых компонентов в комплексных пищевых системах. Упомянутые уси-

лители вкуса включают в себя глутамат натрия и динатриевые соли 5'-нуклеотидов (например, монофосфаты инозина и гуанозина).

### 17.2.8.2 Аромат

Понятие аромата пищевых продуктов гораздо более сложно и тонко. Аромат настолько важен, что он зачастую заменяет собой вкус пищевого продукта. Химические вещества, вносящие свой вклад в формирование аромата, имеют низкую молекулярную массу, они летучи и, как правило, воспринимаются уже при низкой концентрации. Растительные материалы способны развивать собственные вкусоароматические системы, появление которых объясняется обменными процессами. Например, овощи выделяют содержащие серу соединения, некоторые из которых не высвобождаются в качестве составляющих вкуса до тех пор, пока ткань продукта не окажется разрушенной или же пока не произойдет нагрева. Проиллюстрировать выделение вкусовых компонентов при разрушении ткани могут лук и чеснок, а примером выделения этих компонентов при нагреве могут служить белокочанная капуста и брокколи.

Характерный вкус фруктов является результатом сочетания спиртов и кислот с последующим образованием сложных эфиров. Источником происхождения пикантного вкуса является преобразование ароматических аминокислот в ароматические альдегиды. Еще один встречающийся во фруктах класс ароматических соединений, источником появления которых становится метаболизм растений, представляют собой терпены. В роли пищевых ароматических соединений (прежде всего в продуктах животного происхождения) могут выступать и короткоцепочечные жирные кислоты.

Большая часть ароматов, формируемых в процессе переработки, может быть отнесена к трем типам реакций, а именно, реакции Майяра, расщеплению липидов и ферментации. К ароматическим соединениям, образующимся вследствие реакции Майяра, относят альдегиды, спирты, пиразины и кислоты. Результатом расщепления липидов становится появление некоторых из ароматов, характерных для молочных (лактоны) и жареных (определенные альдегиды в картофеле фри) продуктов. Аромат жареного мяса является результатом реакции Майяра и расщепления липидов под воздействием тепла.

Брожение способствует формированию аромата при преобразовании сбраживаемых сахаров в первичные продукты (например, кислоты и альдегиды) и в такие вторичные продукты, как кетоны, сложные эфиры и аминокислоты. Примерами пищевых продуктов, на вкус которых процесс ферментации оказывает значительное воздействие, могут служить сыр, йогурт, вино, пиво, пижули и хлеб. Оптимизация выработки ароматических свойств требует тщательного контроля параметров ферментации: типов микроорганизмов, субстрата, температуры, уровня pH и времени.

Приправы представляют собой ингредиенты, которые либо экстрагируются из естественных источников, либо изготавливаются химически. С нормативной точки зрения различие между натуральными и искусственными приправами в большей степени касается источников и методов обработки, и в меньшей степени — их химического состава. Сочетание используемых в приправах химических веществ обеспечивает или усиливает аромат пищевых продуктов. Как правило, приправы чувствительны к окислению, происходящему в процессе их обработки и хранения. Кроме того, они летучи и могут быть утрачены при нагреве.



### 17.2.8.3 Нежелательные вкусо-ароматические качества

Развитие посторонних привкусов в пищевых продуктах является не менее важным процессом. Не удивительно, что привкусы могут стать результатом потери контроля над протеканием тех же химических реакций, которые являются источником формирования желательных вкусовых качеств. Например, в результате обжаривания «сухих завтраков» появляется характерный вкус, свойственный реакции Майяра, но в то же время чрезмерное обжаривание может привести к утрате вкусовых качеств и развитию привкуса подгоревшего или обуглившегося продукта и горечи. Картофельные чипсы выигрывают от вкуса слегка расщепленного масла, используемого для жарки, но результатом более значительного его окисления станет сокращение срока годности продукта при хранении и формирование привкуса «застарелости».

Появление посторонних привкусов может стать также результатом нежелательной ферментной активности, что особенно касается липидных компонентов пищевых продуктов. Ферментом, вызывающим высвобождение свободных жирных кислот, является липаза, а липоксигеназа способна вызвать ускорение процесса окисления липидов.

Посторонние привкусы, катализированные светом, могут оказаться проблемой, вызываемой сочетанием прозрачной или полупрозрачной упаковки пищевого продукта и воздействия на него света. Бутылки, используемые для розлива пива, имеют, как правило, коричневый цвет, что способствует предотвращению «застоявшегося» вкуса, причиной появления которого становится образование меркаптанового соединения. Особенно чувствительно к воздействию света молоко; в случае попадания на него света в процессе хранения оно приобретает «картонный» привкус. Как правило, окисление липидов катализируется светом. Реакция окисления липидов развивается медленнее, чем другие реакции, катализированные воздействием света, но определяющими могут оказаться именно вкусовые качества, создаваемые в ходе этой реакции. Для предотвращения проявления посторонних привкусов некоторые пищевые продукты следует упаковывать в непрозрачные упаковки или же защищать их от воздействия света иными способами.

Еще одним источником проявления кислого, плесневелого, фруктового или других явных посторонних привкусов является рост микроорганизмов. В процессе переработки и продажи пищевых продуктов проблемой может стать «заражение» пищевых продуктов внешними запахами. Источником появления подобных запахов может стать воздух (например, пары солянки или краски), вода (повышение содержания хлора), дезинфицирующие средства (запах лекарств), моющие средства (запах отдушек или мыла) и упаковка (химические соединения, используемые в пластмассах или в прокладках между слоями продукта).

## 17.3 Химические реакции при обработке пищевых продуктов

Химические реакции, протекающие в определенном пищевом продукте, сложны, многочисленны и влияют на оптимизацию технологического процесса и качественные характеристики изделия. Изучая конкретную пищевую систему можно уяснить набор протекающих реакций, обобщить сведения и понять их в контексте конечного изделия.

### 17.3.1 Хлеб

Химические процессы, имеющие место при хлебопечении, включают в себя смешивание, брожение, выпечку и изменения после выпечки [3, 13]. Основные составляющие хлеба (мука и вода) смешиваются с дрожжами (закваской), солью, сахаром и жирами (шортенингами). На этапе смешивания входящие в состав муки белки глинадин и глютен гидрируются и, взаимодействуя друг с другом, образуют клейковину. Сразу после этого дрожжи начинают преобразовывать сахара в углекислый газ, этанол и кислоту; они также способны образовывать и другие ароматические соединения. Сбраживаемые сахара могут добавляться в качестве ингредиентов или преобразовываться из сахарозы и мальтозы в моносахариды ферментами дрожжей. В случае, если сахар не добавляется, ферменты амилазы, входящие в состав муки или же добавляемые в качестве ингредиентов, медленно расщепляют крахмал, преобразовывая его в мальтозу.

В теплых условиях углекислый газ образовывается быстрее, так как дрожжи быстрее всего растут и бродят при температуре от 25 до 30 °С. Поскольку клейковина растяжима, образующийся газ удерживается в тесте. По мере увеличения объема теста может быть обмято для перераспределения дрожжей и газа. После брожения, степень которого определяется временем или увеличением объема в ходе стадии расстойки, хлеб попадает в печь, нагретую до температуры 200 °С.

В ходе первых этапов выпечки наблюдается увеличение объема тестовой заготовки, объясняющееся расширением газа. Дрожжи быстро инактивируются за счет воздействия высоких температур, и процесс ферментации прекращается. Белки клейковины денатурируют и формируется текстура хлеба. Гранулы крахмала, определяющие объем теста, подвергаются желатинизации, хотя ее степень ограничена количеством воды. Нагрев вызывает испарение влаги и утрату этанола, так что ожидаемая потеря массы в процессе выпечки может составлять до 10%.

Поскольку внешний слой хлеба находится в условиях высокой температуры и низкого уровня влажности, реакция Майяра протекает в основном именно здесь. Аминные группы белков вступают в реакцию с любыми остаточными редуцирующими сахарами, что вызывает потемнение корочки и образование ароматических соединений. При охлаждении хлеба некоторые молекулы крахмала соединяются вновь, что приводит к уплотнению хлебной корочки.

При хранении формируются водородные связи между молекулами крахмала и белков, что вызывает нежелательное отверждение хлеба, являющееся частью его черствения. Этот процесс может быть частично обратим нагреванием, разрывающим водородные связи и восстанавливающим более мягкую структуру поверхности хлеба. К другим реакциям, протекающим в процессе хранения хлеба, относится смягчение хлебной корки, вызываемое уравниванием содержания влаги корки и влажностью окружающей среды. Высокая  $a_w$  внутри хлеба может вызвать разрастание плесневого грибка, хотя наличие плесени объясняется загрязнением окружающей среды спорами плесени после выпечки (так, любая плесень, присутствующая в ингредиентах или на оборудовании, оказывается уничтоженной высокими температурами при выпечке).

### 17.3.2 Плавленный сыр

Технология изготовления плавленого сыра включает в себя свертывание молока, брожение, выдержку и преобразование в плавленный сыр [21]. Молоко обрабатывается ферментом реннином, который расщепляет связь в одном из белков казеина, что вызывает свертывание комплекса мицеллы казеина. Одновременно в молоко добавляют бактерии заквасочной культуры для преобразования лактозы в молочную кислоту. Снижение уровня pH изменяет заряд молекул белков казеина; pH приближается к уровню, соответствующему отсутствию заряда. В результате белки притягиваются друг к другу и формируют полутвердую структуру. В процессе свертывания казеин улавливает только воду и молочный жир, но не задерживает лактозу и белки сыворотки.

В дальнейшем створоженное молоко обезвоживается добавлением соли и прессованием. После этого сыр проходит период созревания, на протяжении которого небольшое количество оставшейся лактозы преобразуется в молочную кислоту, белки расщепляются остаточным реннином и протеолитическими ферментами, источником которых являются бактерии. Результатом распада белков становится размягчение структуры поверхности сыра и развитие его вкусовых качеств. Кроме того, происходит частичный распад триглицеридов молочного жира, что способствует высвобождению жирных кислот и созданию сырного аромата.

Хотя некоторые сорта сыра потребляются непосредственно после выдержки, большое количество сыров перерабатывается в плавленые. Это достигается путем смешивания различных сортов сыра при высокой температуре. В результате смешиваемый сыр преобразуется в жидкость, что объясняется плавлением жира и большей растворимостью белков. Чтобы помочь белкам сыра эмульгировать жир, к смеси добавляются соли фосфорной кислоты, называемые эмульгирующими солями, хотя их задача — сделать белки более эффективными, чем поверхностно-активные вещества. Затем горячий сыр упаковывается, а его структура стабилизируется после охлаждения.

### 17.3.3 Сосиски (хот-доги)

Сосиски представляют собой эмульсии, формируемые при смешении мышечных и жировых тканей с водой, и их дальнейшей обработке [8, 15]. Основной физико-химической реакцией здесь является именно образование эмульсии. Вода и соль образуют рассол, растворяющий мышечные белки и придающий им функции эмульгаторов. Кроме того, соль выступает и в роли консерванта, замедляющего процесс размножения микроорганизмов. В процессе формирования эмульсии рубленое мясо может быть смешано с приправами и нитритами. Такая эмульсия хранится охлажденной, что позволяет жиру оставаться твердым. В процессе копчения и варки пигмент миоглобин вступает в реакцию с добавленными нитритами, придавая продукту стойкий розовый цвет. Поскольку нагрев приводит к некоторой денатурации белков, процесс тщательно контролируется, и чтобы сохранить способность белков к связыванию жира и воды, количество подаваемого тепла ограничивается. При варке за счет расщепления жира формируются вкусоароматические качества продукта, хотя основной вклад в формирование вкуса сосиски вносят добавляемые в нее ингредиенты.

### 17.3.4 Консервированные зеленые бобы

Основными химическими изменениями, происходящими в процессе консервирования зеленых бобов, являются расщепление хлорофилла, размягчение текстуры и развитие вкусоароматических свойств. До фасовки в банки зеленые бобы желательно подвергнуть бланшированию. Бланширование, представляющее собой умеренную тепловую обработку, удаляет из ткани воздух, размягчает текстуру и инактивирует ферменты (например, пероксидазу). Стерилизация банки является более жесткой тепловой обработкой, расширяющей степень воздействия нагрева для инактивации спор *Clostridium botulinum*. Накопление кислоты внутри закрытой тары способствует преобразованию хлорофилла в феофитин, являющегося причиной проявления оливково-зеленого цвета, характерного для консервированных зеленых бобов.

Изменения текстуры вызываются в первую очередь растворением пектиновых веществ, удерживающих клеточную структуру зеленых бобов. Нагрев продукта таков, что это вызывает значительное размягчение ткани. Размягчение текстуры бобов может быть до некоторой степени предотвращено за счет добавления ионов кальция, которые вступают в реакцию с пектиновыми веществами и формируют текстуру. Дальнейший нагрев бобов после вскрытия банки приводит к дополнительному разрушению цвета или текстуры продукта.

Механизмы развития вкусоароматических качеств зеленых бобов известны недостаточно, но консервированный зеленый боб обладает более интенсивным вкусом, чем сырой. В процессе консервирования бобы теряют витамины, неустойчивые к воздействию тепла, и те питательные вещества, которые выщелачиваются в жидкость в процессе нагрева и последующего хранения. Следует упомянуть о том, что потери витамина С в процессе консервирования бобов довольно значительны.

### 17.3.5 Майонез

Майонез представляет собой белое полутвердое вещество, текстура и внешний вид которого формируется эмульгированной эмульсией типа «масло в воде». Диспергированные частицы масла гомогенизируются до очень малого размера, что позволяет стабилизировать эмульсию и увеличить ее вязкость. Главными в процессе эмульгирования становятся яичные желтки (из-за наличия в них фосфолипидов и липопротеинов), являющиеся великолепным эмульгирующим ингредиентом. Эмульгаторы предотвращают нежелательное образование сливок, флокуляцию и коалесценцию масла. Фосфолипиды и липопротеины яичного желтка рассеиваются вокруг капелек масла, что снижает межфазное натяжение и способствует формированию стабильной эмульсии. Эмульсия майонеза остается стабильной при том условии, что она не нагревается и не замораживается. Нагрев ведет к денатурации эмульгирующего белка, а замораживание способствует формированию кристаллов льда, которые при таянии образуют воду в жидкой фазе и вызывают полное разделение масляной и водной фаз.

### 17.3.6 Картофельные чипсы

Реакции, протекающие в процессе изготовления картофельных чипсов, включают в себя обширное обезвоживание картофеля и поглощение жира, заменяющего потерянную воду. В процессе нагрева также происходит развитие вкусоароматических качеств, цвета и текстуры картофеля. Картофель на 78% состоит из воды и на 1% — из жира. Картофельные же чипсы на 1% состоят из воды и на 40% — из жира. Такое изменение соотношения воды и жира происходит вследствие того, что высокая температура вызывает быструю потерю влаги и позволяет используемому для жарки маслу заполнить пустоты, оставляемые улетучивающимся паром.

Светлый золотисто-коричневый цвет картофельных чипсов является результатом реакции Майяра. Уровень содержания сахара в картофеле зависит от условий его хранения. При хранении при низких температурах происходит обратимое накопление сахаров в картофеле, а при его хранении в более теплых условиях сахара преобразуются в крахмал, поэтому для получения равномерного потемнения необходимо контролировать уменьшение содержания сахара за счет поддержания надлежащей температуры хранения.

В картофеле содержится незначительное количество белков, но значительное количество свободных аминокислот, которые способствуют протеканию реакции Майяра. Следует упомянуть также и о необходимости ограничивать воздействие воздуха на нарезанный картофель до начала его нагрева. Продолжительное пребывание картофеля на воздухе приводит к ферментативному потемнению, а такой цвет в конечном продукте неприемлем. Затем картофельные чипсы упаковываются в непрозрачную тару в атмосфере азота, что сводит к минимуму процесс окисления липидов, но даже в этом случае продукт после нескольких месяцев хранения, как правило, теряет качество.

### 17.3.7 Сухие завтраки (мюсли)

Изготовление сухих хлопьев включает в себя изменения текстуры злаковых, вкуса и цвета [4]. В процессе изготовления возможно использование различных технологий, но химические реакции при этом в основном одни и те же. Сначала используемая для изготовления хлопьев мука варится для желатинирования крахмала. На этом этапе белки становятся денатурированными и относительно нефункциональными. Поэтому источником изготовления хлопьев могут быть различные сорта зерновых вне зависимости от того, способны ли белки структурироваться.

После варки материал рубится или выдувается для придания некоторой формы и формирования текстуры. Одним из вариантов является экструзия, поскольку экструдер нагревается, а на выходе из него происходит падение давления, вода отжимается, в результате чего продукту придается форма. Для увеличения сладости продукта в состав рецептуры хлопьев могут входить как редуцирующие, так и не редуцирующие сахара. После экструзии продукт сушится и поджаривается, что способствует развитию его вкусоароматических качеств и цвета, достигаемого посредством реакции Майяра. В качестве барьера, предотвращающего поглощение продуктом влаги во время хранения, возможно покрытие его сахаром после поджаривания. В случае необходимости хлопья обогащают витаминами и добавляют антиокислители (они,

как правило, распыляются на продукт после прохождения им тепловой обработки). Если витамины и антиокислители добавляются до тепловой обработки продукта, то воздействие высоких температур станет причиной их частичного химического расщепления.

Окончательное содержание влаги в хлопьях должно удерживаться на уровне, способном поддерживать их хрустящими и одновременно не дающем хлопьям стать слишком сухими, что благоприятствовало бы окислению липидов. В этом случае большая часть хлопьев из-за поглощения влаги утратит текстуру, а по причине окисления — и вкус. Срок хранения хлопьев, как правило, составляет от 6 до 12 мес.

### 17.3.8 Кексы на основе шортенингов

Смесь ингредиентов для кекса, выпекаемого с использованием шортенингов, сложна как физически, так и химически. Мука, сахар, жир, соль, разрыхлитель и яйца смешиваются с водой для образования смеси, представляющей собой золь, пену, раствор и эмульсию [2]. Такие поверхностно активные вещества, как моноглицериды и яичные желтки, стабилизируют эмульсию масла (шортенинг) в воде. Как эмульсию, так и пену стабилизируют различные загустители, например, резиноподобные вещества. Пена образуется за счет смешения пузырьков воздуха со взбитым тестом. Углекислый газ, высвобождаемый в процессе смешивания, также способствует образованию пены, а яичные белки ее стабилизируют.

Несмотря на существенное смешение белков муки, образования большого количества клейковины не происходит. Объясняется это высоким уровнем содержания воды и жира, а также низкой концентрацией белков. Жир и сахар размягчают кекс за счет сведения к минимуму количества образуемой клейковины.

В процессе нагрева высвобождается большое количество углекислого газа, образуемого разрыхлителем, что увеличивает размер пузырьков газа и объем кекса. Происходит обширная желатинизация крахмала, и за счет поглощения воды в ходе этого процесса формируется структура кекса. Белки пшеницы и яиц денатурируют, способствуя дальнейшему формированию структуры. Корочка кекса становится золотисто-коричневой (скорее за счет карамелизации сахара, чем за счет реакции Майяра). Развитие вкусоароматических качеств кекса в процессе его выпечки незначительно, а в процессе нагрева могут быть частично утрачены некоторые приправы, например, ваниль. В процессе хранения кекс черствеет (вследствие восстановления крахмала).

## Глоссарий

**Коллоидная дисперсия.** Одна из фаз (газовая, жидкая или твердая), диспергированная в другой фазе. Коллоидная дисперсия характерна для гелей, пены и эмульсий.

**Гель.** Полутвердая структура, в которой такие полимеры, как пектин, крахмал или желатин задерживают большие количества воды.

**Стеклование.** Переход полимеров пищевых продуктов (например, крахмала или белков) от стекловидной структуры поверхности к резиноподобной. Причиной такого перехода становится изменение температуры или уровня содержания воды.

**Окисление липидов.** Окисление липидов кислородом воздуха по месту двойных связей, результатом которого становится образование посторонних привкусов (как правило, в процессе хранения).

**Потемнение вследствие реакции Майяра.** Реакция белков с определенными сахарами, результатом которой становится формирование привкусов и коричневого цвета, вызванных воздействием тепла.

**Денатурация белков.** Необратимое изменение пространственного размещения природной молекулы белка, результатом которого становится изменение физических и химических свойств белка.

**Желатинизация крахмала.** Необратимое, вызванное воздействием тепла изменение, происходящее в грануле крахмала и характеризующееся поглощением воды, разбуханием и увеличением вязкости.

**Активность воды.** Парциальное давление воды в пищевом продукте, деленное на парциальное давление чистой воды при одинаковых условиях. Активность воды измеряется посредством гигрометра. Диапазон — от 0 до 1.

## Обозначения

$a_w$	Активность воды (водная активность)
<i>cis</i>	Изомерная форма непредельных соединений, когда все атомы водорода расположены относительно двойной связи «углерод–углерод» по одну сторону углеродной цепочки. В природе жирные кислоты находятся именно в форме « <i>cis</i> »
<i>DE</i>	Декстрозный эквивалент. Мера степени преобразования крахмала в меньшие глюкозные цепочки. По шкале от 0 до 100 чем выше ДЭ, тем больше преобразование и тем ближе свойства к глюкозе; при низком ДЭ наблюдается большая «крахмалоподобность».
$T_g$	Температура стеклования; используется для характеристики полимеров со стекловидными и резиноподобными свойствами. Выше температуры стеклования полимер находится в резиноподобном состоянии, а ниже — в стекловидном
<i>trans</i>	Изомерная форма непредельных соединений, когда все атомы водорода расположены относительно двойной связи «углерод–углерод» по одну сторону углеродной цепочки. В природе жирных кислот в форме « <i>trans</i> » обычно нет, но они преобразуются в эту форму из двойных связей « <i>cis</i> »-кислот как побочный продукт в процессе гидрогенизации.

## Литература

1. Belitz, H.-D. and Grosch, W. Food Chemistry. — Springer-Verlag. — 1987. — P. 201–256.
2. Charley, H. Food Science. — 2nd ed. — NY: Macmillan, 1982. — P. 252–371.
3. Eliasson, A. -C. and Larsson, K. Cereals in Breadmaking: A Molecular Colloidal Approach. — NY: Marcel Dekker, 1993. — P. 261–361.
4. Fast, R. B. and Caldwell, E. F. Breakfast Cereals and How They Are Made. — St. Paul, MN: American Association of Cereal Chemists, 1990. — P. 15–42.

5. Fellows, P. J. Food Processing Technology Principles and Practice. — Ellis Horwood. — 1985. — P. 221–235.
6. Fennema, O. R. Food Chemistry. — NY: Marcel Dekker, 1985. — P. 24–237.
7. Finot, P. A., Aeschbacher, H. U., Hurrell, R. F., and Liardon, R. The Maillard Reaction in Food Processing, Human Nutrition and Physiology. — Birhauser-Verlag. — 1990. — P. 19–40.
8. Girand, J.-P. Technology of Meat Products. — Ellis Horwood. — 1992. — P. 206–262.
9. Hoseney, R. C. Principles of Cereal Science and Technology. — St. Paul, MN: American Association of Cereal Chemists, 1994. — P. 47–48, 301–333.
10. Labuza, T. P. Proceedings SOS/70 Third International Congress of Food Science and Technology. — Chicago: Institute of Food Technologists, 1971. — P. 633.
11. Larsson, K. and Friberg, S. Food Emulsions. — 2nd ed. — NY: Marcel Dekker, 1990. — P. 1–40.
12. Mulvaney, S. J. Personal Communication. — 1994.
13. Pomeranz, Y. Wheat Chemistry and Technology. — 3rd ed. — St. Paul, MN: American Association of Cereal Chemists, 1988. — P. 131–201.
14. Potter, N. N. Food Science. — 4th ed. — Westport, CT: AVI, Van Nostrand Reinhold, 1986. — P. 320–325.
15. Price, J. F. and Schweigert, B. C. The Science of Meat and Meat Products. — Food and Nutrition Press. — 1978. — P. 435–512.
16. Rao, M. A. and Steffe, J. F. Viscoelastic Properties of Food. — Elsevier. — 1992. — P. 335–349.
17. Reineccius, G. A. Source Book of Flavors. — 2nd ed. — Chapman & Hall.
18. Schwartzberg, H. G. and Hartel, R. W. Physical Chemistry of Foods. — NY: Marcel Dekker, 1992. — P. 263–306.
19. Slade, L. and Levine, H. Beyond water activity: recent advanced based on an alternative approach to the assessment of food quality and safety // CRC Crit. Rev. Food Sci. Nutr. — 1991. — № 30(2,3). — P. 115–360.
20. Agriculture Handbook 8. / USDA, Human Nutrition Information Service. — Washington, DC: U. S. Department of Agriculture.
21. Walstra, P. and Jenness, R. Dairy Chemistry and Physics. — NY: John Wiley, 1984. — P. 211–228.



# АЛФАВИТНО-ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

## А

Абрикосовое пюре 19

Абрикосы консервированные 19

Автоклав 75, 332

Автоматическое управление 748

датчики 751–752

запаздывание 756

контур управления 749

модель технологического процесса 749

преобразователи нормирующие 750

распределенное 782

регулирование

аппаратура 781

выявление неисправностей 767–768

затраты 784

двухпозиционное 756

контроль внешних условий 777

контуров 772, 787

методы 770

по производной 761

программируемые логические

контроллеры 783

пропорционально-интегральное 762

пропорциональное 757

разработка системы 785–786

сигналы блокировки 779

составление сметы 785

регулирующие клапаны 753

размеры 753

характеристики 754

регуляторы 748, 751

настройка 763, 766

одноконтурные 781–782

пропорционально-интегральные 760

пропорциональные 757

обратная связь 750

Агрегат для сушки

во вспененном состоянии 160

со сбросом давления 160

Активность воды *см.* Вода, активность  $\alpha$ -лактальбумин 233

Амилопектин 808

Аммиак 642

Аппараты выпарные 263

многокорпусной 264, 274, 290

паропроизводительность 264

однокорпусной 337

однократного выпаривания 288

оптимизация затрат 301

плечный 269, 278

с восходящим движением раство-  
ра 271, 278

с нисходящим движением раство-  
ра 269, 278

производительность по испаренной  
влаге 264

с внутренней нагревательной каме-  
рой 267, 278

с принудительной циркуляцией раст-  
вора 270

типы 267, 278

удельный расход греющего пара 264

эксплуатационная оценка 293

энергопотребление 273

PARAVAP 278

Аппараты морозильные 95

виды 98

воздушные 99, 108, 124, 139, 145, 153

затраты

капитальные 130

эксплуатационные 134

конвейерные 102

спиральные 103

криогенные 105, 124, 153

азотные 105–106

охлаждаемые  $\text{CO}_2$  105

непрерывного действия 154  
 периодического действия 154  
 плиточные 103–104, 123, 145, 147  
 погружные 105, 124  
 расчет 137  
 сравнительные характеристики 99  
 тепловая нагрузка 126  
 тепловой расчет 97  
 требования к расчету 97  
 флюидизационные 101, 103  
 холодильный коэффициент  
 энергопотребление 134  
 Аппараты сушильные 160  
   барабанные 160, 192, 201  
   вакуумные 201  
   вальцовые 160, 201  
   варианты применения 160  
   конвейерные 188  
   ленточные 160  
   лотковые 160, 180–182, 201, 204  
   пневматические 160, 196–197, 201  
   поворотные 160  
   распылительные 160, 192, 201  
   с псевдооживленным слоем 201  
   сублимационные 160, 201  
   туннельные 160, 187–189, 201, 204  
   этапы конструирования 160  
 Апельсиновый сок 19–20  
 Аромат  
   восстановление 266  
 Аррениуса график 64  
 Аррениуса уравнение 168, 444, 464, 499, 558  
 Аспартам 459, 474–477  
**Б**  
 Балансы материальный и энергетический 310  
   общий массовый 319, 322  
   полный энергетический 327  
   связанные 336  
 Банановое пюре 19  
 Белок 455, 811  
   денатурация 813, 833  
   содержание в пищевых продуктах 812

Бернулли уравнение 16  
 Бесселя функция 462  
 $\beta$ -лактоглобулин 233  
 Бингама  
   закон 549  
   тело 556  
 Бингама–Рейнольдса число 27–29  
 Бингама–Шведова модель 556  
 Био число 70, 167, 169  
 Блазиуса формула 24  
 Бланширование 334  
 Бобы  
   зеленые консервированные 830  
   теплопроводность 537  
 Бола метод 81  
 Брикса  
   градус 265  
   шкала 265  
 Брокколи 334  
**В**  
 Вайссемберга эффект 550  
 Вант-Гоффа уравнение 224  
 Вентилятор 127, 131  
 Взвесей параметры 230  
 Вильямса–Ланделя–Ферри уравнение 451–453  
 Вискозиметр 560–567  
   для переменного давления 561  
   Жана 559  
   конусно-плоскостной 562–563  
   Кэннона–Фенске 561  
   Оствальда 560  
   принцип действия 561  
   ротационный 560–561  
   с капиллярной трубкой 559  
   с коаксиальными цилиндрами 562–563  
   с падающим шариком 560  
   Уббелоде 561  
 Витамины 824  
 Вода  
   активность 456, 796–799, 820, 833  
   в природе 795  
   вымороженная 542  
   связанная 115, 798

Водная фракция 519  
Воздушная прослойка в упаковке 115, 125  
Вокадло и Янга уравнение 556  
Вороного мозаика 522  
ВТГ см. Микроорганизмы, время термической гибели  
Выдувное формование 357  
Выпаривание 165, 262, 338  
Вязкость  
    измерение 559  
    кажущаяся 25  
        пищевых продуктов 265, 555  
        растворов 555  
        сахарозы 564

## Г

Гамбургер 494  
Гиббса уравнение 224  
Гигроскопические свойства продукта 162  
Газовая постоянная 64  
Гель 832  
    см. также Пищевые продукты, гели  
Гершеля–Балкли модель 556  
Горчица 18  
Грушевое пюре 21  
Груши  
    плотность 539  
    теплопроводность 537

## Д

Давление  
    падение в трубе 16  
Девара колба 528  
Дежа 588  
Декстрога 281  
Деформации тензор 546  
Дисперсия коллоидная 832  
Доля замороженной воды 115

## Ж

Жарка 821  
Желатин 233, 281  
Желатинизация 833  
Жидкости  
    вязкопластичные по Бингаму 27, 46

Гершеля–Балкли 29, 46  
неньютоновы 16, 23  
ньютоновы 43, 48  
псевдопластичные 24  
Жиры 450, 815  
    вязкость 543  
    окисление 819  
    содержание в пищевых продуктах 816  
    строение химическое 815  
    теплоемкость удельная 543  
    функции 817–818

## З

Загрязнение  
    греющих поверхностей 266, 282  
Замораживание 95  
    в потоке воздуха 99  
    определение времени 109  
        аналитические методы 110  
        численные методы 109  
    пиццы (расчет времени) 141  
    понижение температуры замерзания 115  
    продолжительность 142, 148–149  
    физические основы 107  
Затраты  
    капитальные 639  
    оценка 635  
    эксплуатационные 649  
Змеевик испарителя 154

## И

Испарение 263  
Испаритель 131, 263  
    вакуумный 264  
    длиннотрубный 269  
    кожухотрубный 274  
    расчеты 283  
    с пластинчатым теплообменником 272  
    с подводом механической энергии  
    с термическим ускорением см. TASTE

## Й

Йогурт  
    реологические свойства 569

**К**

Казеин 233  
Калач U-образный 701–703  
    соединение 712  
Калоризатор 263  
Калориметр дифференциальный сканирующий 529  
Камера нагревательная 263  
Кармана зависимость 24  
Каррагинан 811  
Картофель  
    плотность 539  
    сушка 173  
    теплоемкость удельная 537–538  
    теплопроводность 537–538  
Кассона модель 556  
Кевенна шкала 265  
Кексы  
    на основе шортенингов 832  
Кельвина  
    модель 544  
Кельвина–Фойгта  
    тело 552, 557  
Кетчуп  
    реологические свойства 569  
Кийя формула 541  
Кислотность пищевых продуктов 57  
Клапан 39  
    дросселирующий 235  
    компрессионного типа 698  
    пневматический 697  
    предохранительный 744  
Клапейрона–Клаузиуса уравнение 115  
Кнудсена диффузия 406  
Кокс–Мерца правило 557  
Коллаген 233  
Компрессор 132  
    бустерный 154  
    холодопроизводительность 133  
Конвекция 66, 163  
Кондукция 163  
Конденсатор 132  
Концентрационная поляризация 220  
Коробка картонная 138

**Коэффициент**

диффузии 229, 233, 417  
местных потерь 38, 40  
    проницаемости 317  
    растворимости 417  
теплоотдачи в выпарных аппаратах 279–280  
теплопередачи испарителей 279, 281  
трения 22, 26  
    вязкопластичных жидкостей 27, 29–30  
    жидкостей Гершеля–Балкли 32–36  
    пищевых продуктов 25  
    пластмассовой пленки 363  
    турбулентного потока 29  
Крабы 343–345  
Крахмал 808  
    желатинизация 833  
    модифицированный 809–810  
Красители 821  
    водорастворимые 823  
    жирорастворимые 821  
    каротиноиды 822  
    миоглобин 823  
Кукурузный сироп 281  
Кукурузное масло 281  
Кукурузы початок 137  
Криогенного вещества расход 135

**Л**

Левека раствор 229  
Лед  
    распределение кристаллов 97  
Лецитин 803  
Липиды см. Жиры  
Лущение 321  
Льюиса и Нильсена уравнение 521

**М**

Майонез 18  
    реологические свойства 569  
    химические реакции 830  
Майяра реакция 441, 806–807, 826, 833  
Макаронные изделия  
    теплофизические свойства 540

- Максвелла  
уравнение 520, 522  
модель 544  
тело 557–558
- Максвелла–Эйкена модель 119
- Манговое пюре 19
- Масла  
вязкость 543  
для жарки 820–821  
растительное 18  
сливочное  
    реологические свойства 569
- Масса неводных компонентов 116
- Массовая доля 348
- Массообмен 163  
    в упаковочных системах 405  
    сквозь микроотверстия 406
- Массоотдачи коэффициент (в погранич-  
ном слое) 224, 229
- Массоперенос 169
- Материалы упаковочные  
    эластичные 358
- Мед 18
- Мембраны 210  
    в пищевой промышленности 248  
    гидравлическое сопротивление слоя 229  
    диапазон фильтрования 219  
    композитные на основе обратного ос-  
    моса 217  
    материалы 219  
    очистка 247  
        механическая 247  
        химическая 247–248  
    полимерные 217  
    производство травлением 216  
    сопротивление 229  
    стоимость 252–253  
    структура 217
- Мембранная система  
    «загрузка–выгрузка» 236–237, 243  
    непрерывная 244  
    однопроходная 237  
    очистки 244  
    порционная 243  
    проектирование 234  
        испытание опытной установки 241  
        расчеты 241  
        с параллельными потоками пермеата 241  
        с частичной рециркуляцией 235  
        стоимость 252–253  
        управление 248
- Мембранный модуль 216, 218  
    полые волоконные 218  
    спиральные 218  
    трубчатые 218
- Мембранный процесс 210
- Мизрахи–Берка модель 556
- Микроорганизмы  
    время термической гибели 60, 62, 78  
    кривая выживания» 58–59  
    летальность 65, 77  
    показатель температурной чувстви-  
    тельности 61  
    скорость разрушения 58  
    термоустойчивость 58, 61  
    энергия активации 62
- Миксограф 585, 600
- Минеральные вещества 824
- Михаэлиса–Ментен уравнение 442
- Моделирование  
    кинетическое 469  
    расчеты 469–470  
    сроков годности 473
- Модуль упругости см. Юнга модуль
- Мойка  
    безразборная 678  
        в производстве жидких пищевых  
        продуктов 709  
        в производстве сухих пищевых  
        продуктов 716, 719  
        водопотребление 684  
        датчики 689  
        конвейеры 707  
        моющие средства 734  
        оборудование рециркуляционное  
        681, 692–693  
        ополаскивание 724–725  
        оценка результатов 738  
        подача химикатов, оборудование 686  
        последовательность обработки 733

программа CIP 688, 690  
проектирование 704, 708  
резервуары 682, 705  
станция CIP 680  
сточные воды 737  
сушилок и печей 706, 729  
транспортёры 726  
требования к материалам 708  
трубопроводы 682, 692, 706  
экономические аспекты 739  
под давлением 744  
несмешиваемость сред 700  
струйная 694  
форсунки 695–696  
Молоко 17  
обезжиренное 233, 281  
сгущенное  
    реологические свойства 569  
    цельное 233  
Молочная сыворотка 233  
Молочные продукты  
    теплопроводность 533  
Морковное пюре 19  
Морковь  
    плотность 539  
Мороженое  
    реологические свойства 568  
Морозильные аппараты *см.* Аппараты  
    морозильные  
Морозильные устройства (камеры)  
    с естественным движением воздуха 101  
    с интенсивным движением воздуха 102  
Мука гороховая  
    оптимизация производства 670  
Муни уравнение 568  
Мюсли 831  
Мясные продукты  
    теплофизические свойства 533–535  
Мясо 17  
    реологические свойства 569

## Н

Накипь 266  
Напиток шоколадный 474  
Напряжение  
    касательное 545

нормальное 545  
релаксация 552  
сдвига 22, 545  
Насос 127  
    нагнетательный 235  
Неферментативное потемнение 468–  
    469, 472  
    *см. также* Майяра реакция  
Нутриент 795

## О

Объемный расход 24  
Операции технологические  
    непрерывные 317  
    периодические 317  
    полунепрерывные 317  
Опрессовка под давлением 356  
Оствальда-де-Веле уравнение 555  
Оттаивание 128–129  
Отходы пищевые 642  
Охлаждение  
    льдом 341

## П

Падение давления в трубопроводе 133  
Пар  
    вторичный 264  
    механическая компрессия 273  
    насыщенный  
        скрытая теплота конденсации 287  
        температура 154  
        термическая компрессия 273  
Парообразование 263  
Пароотделитель 263  
Паштет рыбный 17  
Пены 804  
Пенообразование 265  
Перепад давления в трубопроводе 31  
Период подготовки 75–76  
Пермеат 211, 217, 220, 221, 226, 235, 238  
Персиковое пюре 20  
Пищевая система 478  
Пищевые продукты  
    высококислотные 57  
    вязкие 549  
    гели 558, 801

дилатантные 549  
жидкие 547  
замороженные 465, 488, 497  
качество 432, 488  
    влияние окружающей среды 443, 456  
    кинетика ухудшения 434  
    кинетическая модель 499  
    компьютерное моделирование 500  
    методы оценки 489–494  
    моделирование изменений 497  
    оценка 505  
    показатель 489  
    прогнозирование 500  
    функция 438  
кислотность 459  
коллоидные 801  
консервированные 465  
моделирование 662, 665  
    программное обеспечение 668  
низкокислотные 57  
    обезвоженные 465  
общая стабильность 457  
охлажденные 465  
плотность 529  
    измерение 529  
полужидкие 547  
полутвердые 550, 557  
псевдопластичные 549  
пористость 522  
пористые  
    теплопроводность 535  
реопектиновые 550  
свойства  
    аромат 826  
    вкус 825  
    динамические 552–554  
    реологические 544, 554, 564  
    теплофизические 515, 520  
способность к испарению 264  
средней кислотности 57  
срок годности 495  
    критерий 495  
    прогнозирование 506  
    стратегии определения 495  
срок хранения 432, 488, 497, 508

    график 448  
    контроль 464  
    прогнозирование 464  
    ускоренные методы оценки 464  
текстура 456, 572, 800  
    средства измерения 573  
тиксотропные 550  
транспортная цепь 503  
форма 521  
эмульсии 800  
    управление запасами 502  
    стратегии 503–505  
Пищевые производства  
    проектирование 669  
Планка формула 110  
Пластмассы  
    виды  
        иономеры 372  
        металлоцены 379  
        нейлон 388  
        поливинилиденхлорид 382  
        поливиниловый спирт 385  
        поливинилхлорид 380  
        поликарбонаты 394  
        полиолефины 366  
        полипропилен 375  
        полистирол 384  
        полиэтилен 367  
        полиэтилентерефталат 391  
        севиленовые 369  
добавки 395  
    антиадгезивные 397  
    антиоксиданты 398  
    антистатики 399  
    бактерицидные 397  
    красители 400  
    пластификаторы 403  
    противовуалирующие 396  
    стабилизаторы УФ-излучения 404  
    термостабилизаторы 402–403  
    фунгицидные 397  
свойства 361  
    адгезивность 364  
    глянец 364  
    плотность 363

потускнение 364  
прозрачность 364  
проницаемость 364, 412  
прочность на растяжение 362  
прочность при разрыве 363  
смачиваемость 365  
сопротивление излому 363  
сопротивление образованию от-  
верстий 363  
сопротивление прорыву 363  
стойкость к химическому воз-  
действию 365  
температура термосваривания 363  
ударная вязкость 363  
формоустойчивость 364  
Пластомеры полиолефиновые 359  
Плотность пищевых продуктов 117,  
518–519, 529  
Ползучесть  
кривая 551  
модуль 551  
Полисульфон 213  
Половинная толщина продукта 112  
Помол 321  
Пористость продукта 115, 154  
продолжительность замораживания 143  
Порог чувствительности 508  
Потери механической энергии  
на местных сопротивлениях 40  
Потеря массы продукты вследствие  
усушки 135  
Потеря напора 22  
Поток  
жидкости  
ламинарный 22, 25, 47  
турбулентный 21, 48  
нестационарный 348  
стационарный 348  
Предел текучести 27  
Пуазейля поток 410  
Пуассона коэффициент 572  
Пюре  
из гуавы 19  
из папайи 20  
фруктовое 341

## Р

Рауля закон 115  
Регенерация 235  
Рейнольдса  
критерий 259  
число 24–25, 50  
критическое 25–26, 31  
Реологические свойства пищевых про-  
дуктов 17  
Реологический закон 23  
Реогониометр 564–567  
Реометр 564–567  
Ретентат 216, 226, 235  
Рыбное филе 138

## С

Сахар 281, 804  
реакции 805  
Сгущение 266  
Сдвиг 547  
модуль 572  
Скорость  
замораживания 97  
потока, средняя 24  
сдвига, относительная 27  
Сливки 17  
Сливовое пюре 21  
Смета  
оценка отдельных статей 644  
Соевый  
белок 233  
экстракт 233  
Соки  
апельсиновый  
удельная теплоемкость 286  
вишневый 532  
грейпфрутовый 532  
грушевый  
реологические свойства 569  
концентрирование 256, 339  
вымораживанием 339  
осветление 255–256  
теплофизические свойства 531  
томатный, реологические свойства 569  
реологические свойства 569



фруктовые 532

яблочный

концентрат, максимизация при-  
были 672

осветленный 532

Сосиски 829

Стеклование 800, 832

Степенной закон 24

Стерилизация 55

Стефана задача 170

Стокса–Эйнштейна уравнение 229, 233

Сточные воды 257

Стумбо метод 86

Сушилки см. Аппараты сушильные

Сушильный шкаф см. Аппараты су-  
шильные, лотковые

Сушка пищевых продуктов

балансы массы и энергии 171–173

диффузионная модель 168

интенсивность воздушного потока 175

кинетика 165

конвекционная 166

кривая сушки 165–166, 170

модель отступающего фронта 170–171

оценка затрат 202

сгорание газа 175

риски 205

скорость 165

смешивание воздушных потоков 174

схема процесса 172

Сывороточный белок 254–255

Сыр плавленый 829

## Т

ТВИ см. Температурно-временной инди-  
катор

Текучесть расплава 362

Текстура см. Пищевые продукты, текстура

Температура

плавления 361

стеклования 362

хранения 465

«Температура–время», зависимость 265,  
288

Температурная депрессия 265

Температурная история продукта 71

Температурно-временной индикатор  
466–567

Температурный

скачок 267

эквивалент 154

Температуропроводность 527

измерение 527

коэффициент 518

Тепловая нагрузка 126

пиковая 129

уменьшение 129

Тепловой роток 67

Теплоемкость

измерение 528

удельная 117, 330, 518–519, 528

Теплообменник 787

трубчатый 331

Теплоотдача

конвективная 68–69

Теплопередача 67, 122, 163

коэффициент 122

Теплоприток через изоляцию 128

Теплопроводность 66–67, 119, 516

коэффициент 522

методы измерения 523

модель 108, 516

параллельная 517

последовательная 517

со случайным распределением  
слоев 517

упаковочных материалов 125

Теплопроницаемость 71–73

Теплота

ощутимая 330, 332

скрытая 118, 330

Теплофизические свойства продукта 113,  
118, 121, 162

метод расчета 121

Термический центр 154

Термодатчик 526

Термообработка

принципы 56

расчеты 77–92

теплообмен 66

Термоформование 358

Тесто 582

вальцевание 614

виды 582

вымешивание 583

замешивание

управление 601

обминка 583

развитие 583

раскатывание 602–603

слоение 602, 609

методы 609

теплоемкость 597

теплопередача 597

толщина 629

упругость 583

формирование 583

Тестовальцовочные машины 605–609

деформация валов и подшипников 630

настольные 606

многовальцовые 609

оценка производительности 615

реверсивные 607

трехвальцовые 605

четыrehвальцовые 605

Тестомесильные машины 585

баланс энергии 596

вертикальные 586

высокоскоростные 592–593

геометрия штифтов 600

горизонтальные 589–590

непрерывного действия 595

челночные 586

экструдер 606

Тиамин 470, 472

Тиу и Богера модель 556

Томатная паста 281

реологические свойства 569

Томатный сок 21

Торранса уравнение 30

Точка кипения

превышение 265, 281

Трубопровод 16

выбор оптимального диаметра 51

Тыквенное пюре 21

## У

Углеводы 450

Упаковка 142

в модифицируемой газовой среде 459

в регулируемой газовой среде 459

затраты 354

многослойная 360

пластиковая 353

материалы комбинированные 387

пленки с покрытием 395

тип 521

## Ф

Фазовое изменение 108

Фама метод 87

Фаринограмма 584

Фаринограф 583–584

Фильтрование

диафильтрация 239

загрязнение 245

мембранное 211, 253

отделение 324

принципы 220

микрофильтрация 211, 226

модель переноса 228

нанофильтрация 211

обратный осмос 211, 221, 226, 236

материальный баланс 324

прямой осмос 324

статическое 210–211

тангенциально-поточное 210–211, 234, 253

ультрафильтрация 211, 231

модель переноса 231

Фисташки

теплофизические свойства 538

Фитинг 39

Флэш-камера 263

Форма продукта

коэффициент 112–113

Фурье закон 66

## Х

Хана модель 556

Хедстрема число 27–30

**Хлеб**

- теплофизические свойства 540
- химические реакции 828

Холодильный коэффициент 154

Холодопроизводительность 130

компрессора 154

**Ц**

Целлюлоза 807

**Ч**

Черничное пюре 19

Чеснок

- плотность 539

Чечевица

- теплопроводность 537

Чипсы картофельные 831

**Ш**

Шелушение 321

Шервуда критерий 225, 259

Шмидта критерий 259

Шоколад 18, 474

- реологические свойства 569

Шортенинг 609

**Э**

Эйлера число 790

Эмульгаторы 802

Энергия

- кинетическая 37
- коэффициент коррекции 38
- механическая 16
- баланс, уравнение 16

Энтальпия 118, 329, 542

- криогенных веществ 136

Эссенция 266

Эталонное вещество 529

**Ю**

Юнга модуль 362, 572

**Я**

Яблоки

- теплофизические свойства 535–536

Яблочное пюре 19

- затраты на производство 651

- эксплуатационные затраты 650

Яблочный соус 19

Яичный

белок 233

желток, реологические свойства 569

Яйцо целое

- реологические свойства 569

Ячмень

- теплопроводность 537

**А**

ASLT *см.* Пищевые продукты, срок хранения, ускоренные методы

**В**

*B. stearothermophilus* 57

*B. thermoacidurans* 57

*B. thermosaccolyticum* 57

**С**

*C. botulinum* 57–58, 66

CIP-мойка *см.* Мойка, безразборная

CUT 75–76

**Н**

HTST 274

**Р**

PARAVAP (выпарной аппарат) 278

**Т**

TASTE 274, 304

**W**

WLF-уравнение *см.* Вильямса–Ланделя–Ферри уравнение

*Валентас К. Дж., Ротштейн Э., Сингх Р. П.*

## **ПИЩЕВАЯ ИНЖЕНЕРИЯ**

**Справочник с примерами расчетов**

*Пер. с англ. В. Ашкинази, В. Игнатовича, С. Легошина, Д. Рапопорта, Н. Савченкова.*

**ISBN 5-93913-045-3**



Научный редактор *А. Л. Ишевский*  
Ответственный редактор *Д. К. Рапопорт*  
Дизайн и верстка *И. В. Артемьева*  
Обработка иллюстраций *И. Рыбина*  
Дизайн обложки *Р. В. Бабкина*  
Корректор *О. Д. Камнева*

Лицензия № ИД 00469 от 25.11.1999 г.

Подписано к печати 20.10.2003.

Формат 70 × 100 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Объем 53 печ. л. Заказ № 624.

**Издательство «Профессия»**

Санкт-Петербург, 191002, а/я 600

Тел./факс: (812) 140-12-60. URL: [www.professija.ru](http://www.professija.ru),

e-mail: [bookpost@professija.ru](mailto:bookpost@professija.ru)

Текст издания отпечатан тиражом 2000 экз. с готовых диапозитивов  
в ФГУП ордена Трудового Красного Знамени «Техническая книга»  
Министерства Российской Федерации по делам печати,  
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.  
190005, Санкт-Петербург, Измайловский пр., 29.

Полимеры-*F* включают в себя типы *F-239* и *F-278*. Эти полимеры используются для покрытия пластиковых пленок, например, целлофана и полиэстера, что позволяет добиться водопроницаемости от  $2,0 \text{ г} \cdot \text{мкм}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут} \cdot \text{кПа})$  и проницаемости кислородом примерно  $0,09 \text{ мл} \cdot \text{мкм}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут} \cdot \text{кПа})$ . *F-310* используется для покрытия бумаги. Температура термосклеивания полимеров-*F* колеблется в диапазоне от 100 до 130 °С.

Латексы применяются для покрытия мелованной бумаги или картона, а также пластиковых пленок, например, из ПП и ПЭ. Кроме того, латексом могут быть покрыты жесткие упаковки, изготовленные из таких материалов, как ПЭТ, ПВХ, ПС и ПЭ. Защитные свойства латексов схожи со свойствами полимеров-*F*.

Экструзионные полимеры используются для эластичных упаковок в однослойных и многослойных (соэкструдированных или ламинированных конструкциях). Они применяются для упаковки мяса и других пищевых продуктов. Для не замороженных продуктов в эластичной таре полимеры могут быть соэкструдированы с ПП или ПС. Экструзионные полимеры обладают худшими защитными характеристиками, чем полимеры-*F* или латексы. Пленки *Saran HB* (с хлористым винилом в качестве сополимера) имеют лучшие защитные свойства, чем полимеры-*F*, и их проницаемость кислородом доходит до значения, равного  $0,04 \text{ мкм}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут} \cdot \text{кПа})$ .

### 8.3.3.3 Варианты применения

Как уже отмечалось выше, для обработки полимеров *Saran* существуют различные методы, позволяющие получать заданные свойства упаковки для продукта. К этим методам можно отнести экструзию, соэкструзию, ламинирование и латексное покрытие. Кроме того, в промышленности получили распространение такие методы, как опрессовка под давлением, получение пленки методом экструзии с раздувом и отлив пленки из раствора. При упаковывании пищевых продуктов *Saran* используется в основном в качестве защитного материала, предотвращающего проникновение влаги, газов, привкусов и запахов. Однослойные пленки получили широкое распространение в качестве упаковок, используемых в домашнем хозяйстве.

Многослойные пленки, получаемые в основном путем соэкструзией с полиолефинами, используются для упаковки мяса, сыра и других продуктов, чувствительных к воздействию влаги и газов. Материалы, как правило, содержат от 10 до 20% сополимера ВДХ. Обычно они используются в качестве термоусадочных пленок, обеспечивающих защитный слой внутри термоформованной тары. Такая тара представляет собой соэкструдированную многослойную конструкцию и является стабильной при хранении; кроме того, она поддается стерилизации.

Промышленное использование однослойных пленок включает в себя изготовление порционных упаковок, прокладок внутри бочек и упаковок, предназначенных для хранения продуктов, чувствительных к воздействию влаги, кислорода и растворителей. Такие пленки получили распространение при упаковке косметических и фармацевтических средств. FDA разрешило использование ПВДХ для непосредственного контакта с пищевыми продуктами, что подтверждено в 21 CFR (раздел 175.105 для клейких (связующих) веществ, 175.320 — для покрытия полиолефинов, 176.170 — для бумаги, контактирующей с водянистыми и жирными пищевыми продуктами, 176.180 — для контакта с сухими пищевыми продуктами и 177.1990 — для полимеров).

**Поставщики PVDC:** *Dow Plastics* (г. Мидлэнд, штат Мичиган).